

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

**Multiparametrická diagnostika
obráběcího centra Hermle C30U**

**Multiparametrics diagnosis
of machining center Hermle C30U**

Student:

Bc. Jan Škrabal

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jan Škrabal

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma:

Multiparametrická diagnostika obráběcího centra Hermle C30U
Multiparametrics Diagnosis of Machining Center Hermle C30U

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Pro potřeby této diplomové práce zvolte vhodné metody technické diagnostiky a aplikujte je na obráběcí stroje. Věnujte pozornost zvláště vibrodiagnostice a tribodiagnostice. Proveďte potřebná vibrodiagnostická měření, odeberte provozní kapaliny a proveďte potřebná vyhodnocení a zpracování dat. Získaná data analyzujte a proveďte patřičné vyhodnocení a doporučení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka.* Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály firem - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN ISO 10 816 *Vibrace-Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech.* Praha: Český normalizační institut, 1998.

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika.* 1. vydání, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6

ŠAFR, E. *Tribotechnika.* Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 300 s. 04-243-84

ŠAFR, E. *Technika mazání.* 2. dopl. vydání, SNTL Praha - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1970. 381 s. ISBN 04-010-70

HRADECKÝ, F., VLK, M. *Tribotechnika.* 1. vydání, Praha : SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 297 s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory.* Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura.* Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:.....

.....

podpis

Jan Škrabal

Rudy Kubíčka 989, Uherské Hradiště 686 05

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Blatovi, Ph.D., za konzultace, odborné vedení a za cenné rady při vypracovávání této diplomové práce. Dále děkuji společnosti Ray Service a.s. za umožněnou spolupráci a panu Davidovi Gajarskému za ochotu, rady a spolupráci při měření.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. ŠKRABAL, J. Multiparametrická diagnostika obráběcího centra Hermle C30 U: *Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2017, 80 s. Vedoucí práce: Ing. Jan Blata, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá multiparametrickou diagnostikou obráběcího centra Hermle C30U. Nejdříve jsou popsány základní metody technické diagnostiky. Následně jsou popsány použité metody vibrodiagnostiky, tribodiagnostiky a termodiagnostiky. Další části se týkají provedení vlastního měření, popisu stroje, použitých zařízení a analýzy naměřených dat. Analýza naměřených dat byla tvořena postupně pro vibrodiagnostiku, tribodiagnostiku a termodiagnostiku. V posledních dvou bodech je provedeno zhodnocení měření a doporučení.

Klíčová slova: Diagnostika, Vibrodiagnostika, Tribodiagnostika, Termodiagnostika

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

Bc. ŠKRABAL, J. Multiparametrics diagnosis of machining center Hermle C30 U: *Diploma thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production machindes and design, 2017, 80 p. Thesis head: Ing. Jan Blata, Ph.D.

The theme of the diploma thesis is multiparametrics diagnosis of machining center Hermle C30U. The introduction deals with the basics of technical diagnostics. Next chapters are about vibrodiagnostics, tribodiagnosics and thermodiagnosics. In next chapters I deal with the measurement, description of the machining center and used measuring instruments and analysis of measured data. Analysis of measured data was gradually made for vibrodiagnostics than tribodiagnosics and thermodiagnosics. In the last chapters of my diploma thesis is an assessment of measurement and my recommendations.

Keywords: Diagnostics, Vibrodiagnostics, Tribodiagnosics, Thermodiagnosics

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
Úvod.....	12
1. Informace o společnosti Ray Service a.s.....	13
2. Technická diagnostika obráběcího centra	15
2.1 Technický, technologický a ekonomický význam	16
3. Vibrodiagnostika	17
3.1 Snímače vibrací.....	17
3.1.1 Připevnění snímačů	19
3.2 Základní metody vibrační diagnostiky.....	19
3.3 Frekvenční analýza pomocí FFT.....	20
3.4 Obálková metoda (ENVELOPE)	21
3.5 Kepstrální analýza.....	21
3.6 Diagnostika poruch obráběcích center	22
3.7 Nesouosost	22
3.8 Nevývaha.....	23
4. Tribodiagnostika.....	26
4.1 Odběr vzorků.....	26
4.2 Spektrální analýza	27
4.3 Rentgenová spektrometrie.....	28
4.4 Refraktometrie	29
5. Termodiagnostika.....	30

5.1 Teplota	30
5.2 Bezkontaktní měření a teploměry	30
5.2.1 Pyrometry	31
5.2.2 IR kamery	31
6. Praktické provedení měření	33
6.1 Obráběcí centrum Hermle C30U	33
6.1.1 Základní parametry obráběcího centra	34
6.1.2 Výměna elektromotoru a vřetene	35
7. Vibrodiagnostické měření	36
7.1 Analyzátor Adash A4400-VA4 Pro	36
7.2 Druh a uchycení snímačů	38
7.3 Hodnocení vibrací	39
7.4 Analýza naměřených hodnot	39
7.4.1 První měření	40
7.4.2 Druhé měření	46
7.4.3 Měření rezonance a Bump test	53
7.4.4 Srovnání a zhodnocení vibrodiagnostického měření	60
8. Tribodiagnostické měření	64
8.1 Odběr vzorků	64
8.2 Rentgenová spektrometrie	65
8.3 Spektrální analýza FT-IR	66
8.4 Měření refraktometrem	69

8.5 Stanovení kódu čistoty	70
8.6 Zhodnocení tribodiagnostického měření.....	71
9. Termodiagnostické měření	72
9.1 IR termokamera Fluke Ti32	72
9.2 Měřená místa.....	72
9.3 Zhodnocení termografického měření	76
10. Zhodnocení a doporučení	77
11. Závěr.....	78
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	79

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Název	Jednotky
mm	Milimetr	
f_0	Otáčková frekvence	[Hz]
μm	Mikrometr	
ml	Mililitr	
ms	Milisekunda	
N	Newton	
Nm	Newton metr	
dB	Decibel	
kW	Kilowatt	
Kg	Kilogram	
Ot/min	Otáčky za minutu	
Ω	Ohm	
V	Volt	
Hz	Hertz	
t	Teplota	[°C]
FFT	Rychlá Furierova transformace	
FT-IR	Infračervená spektrometrie s FFT	
TAN	Číslo celkové kyselosti	
RI	Refrakční index	
ZnSe	Selenid Zinečnatý	
a.s.	Akciová společnost	

Úvod

Cílem každé společnosti je docílit co největší produktivity s nízkými náklady a velkým ziskem. K docílení těchto požadavků je nutná znalost technického stavu zařízení. Zavedení technické diagnostiky do společnosti jako součást výroby je zpočátku finančně nákladná, ale do budoucna vratná investice. Multiparametrický přístup dokáže odhalit nezjistitelné závady na rozdíl od použití pouze jedné diagnostické metody. Tento přístup zvýší jistotu rozhodování o technickém stavu stroje. Snížení nákladů na výrobu na minimum je docíleno zvýšením spolehlivosti i životnosti strojů a pravidelnou údržbou. Z výsledků měření je určena doba do poruchy a díky plánovaným odstávkám pro opravu stroje jsou prostoje minimální.

Multiparametrická diagnostika spočívá v použití více diagnostických, měřících metod. Kombinace vibrodiagnostiky, tribodiagnostiky a termodiagnostiky zlepší detekci a diagnostiku závad. Použití vhodných metod technické bezdemontážní diagnostiky umožní zvýšit provozní spolehlivost.

Cílem této diplomové práce je zjištění technického stavu obráběcího centra pomocí vhodných metod technické bezdemontážní diagnostiky ve společnosti Ray Service a.s., sídlící ve Starém Městě u Uherského Hradiště. Hlavní částí této diplomové práce je provedení měření na stroji, jeho analýza a vyhodnocení. Díky těmto analýzám je vypracován návrh řešení a doporučení.

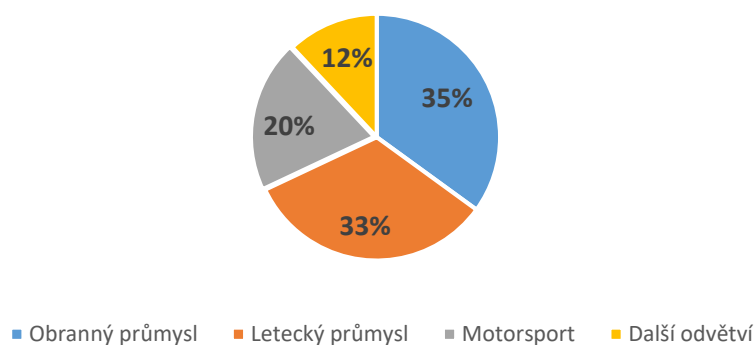
1. Informace o společnosti Ray Service a.s.

K tvorbě kapitoly jsem čerpal ze zdroje [10]. Ray Service a.s. je česká výrobně obchodní společnost, která poskytuje řešení ve výrobě kabelových svazků, elektronických zařízení, elektromechanických celků a dodávek kabelových komponent. Společnost se stala za 20 let zkušeností v oboru spolehlivým partnerem a distributorem na nadnárodní úrovni. Prosadila se na trhu vojenském, leteckém a průmyslové techniky. Nyní se podílí na programech vývoje a modernizace České armády.



Obr. 1 Sídlo společnosti Ray Service a.s. [10]

Vývoj a výroba se zaměřuje především na kabelové svazky a elektromechanické celky.



Společnost již od založení spolupracuje na vývoji a modernizaci vojenské techniky, letecké techniky a motorsportu. Výroba kabeláže a elektromechanických sestav pro Airbus a Boeing, se specializací na složitou kabeláž.



Obr. 2 Kabeláže a elektromechanická sestava [10]

Dalším výrobním odvětvím jsou hliníkové boxy, které se obrábí na 5osém obráběcím centru Hermle C30U. Tento stroj je využíván především při hrubování hliníkových slitin.



Obr. 3 Obráběcí centrum Hermle C30U [11]

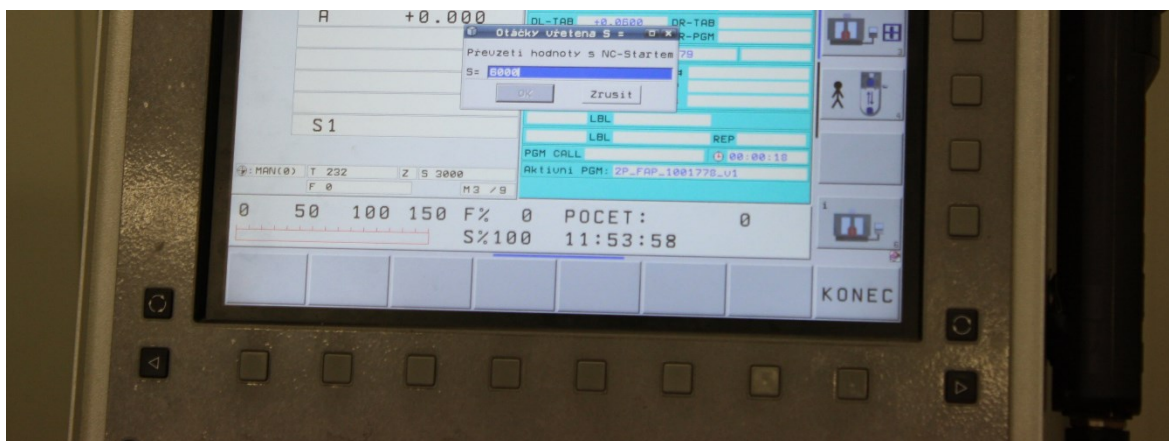
Na tomto stroji proběhla všechna měření této diplomové práce, právě při hrubování hliníkového boxu.

2. Technická diagnostika obráběcího centra

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal ze zdrojů [1], [2], [3] a [4]. Technická diagnostika je vědní obor, který se zabývá metodami a prostředky diagnostiky. Rozdělení technické diagnostiky na bezdemontážní a nedestruktivní metody, je základní rozdělení, pro diagnostiku obráběcího centra se obvykle volí nedestruktivní diagnostika. Základním parametrem diagnostiky jsou vibrace. Naměřené vibrace po následné analýze poskytnou informace o skutečném technickém stavu stroje. Výsledky analýzy určí nutnost opravy a její rozsah. Technická diagnostika se dá považovat za nejvýznamnější nástroj revizní a inspekční činnosti i autonomní údržby.

K určení celkového stavu zařízení je použita kombinace více metod technické diagnostiky. Jedná se o tzv. multiparametrickou diagnostiku. U 5osého obráběcího centra by pouhá vibrodiagnostika byla vhodnou metodou technické diagnostiky, ale pro určení skutečného stavu s větší jistotou je třeba zkontrolovat celý stroj a to více metodami. Složitost obráběcího centra s otočným stolem a tolika stupni volnosti přímo vede k použití kombinace vibrodiagnostiky, tribodiagnostiky a termodiagnostiky. Provoz obráběcího centra se neobejde bez použití metod technické diagnostiky. Pravidelná údržba přispívá velkou mírou k bezporuchovosti stroje.

Použití metod nedestruktivní technické diagnostiky komplikují konstrukce (zakrytování stroje) a provozní podmínky stroje (provoz pouze se zavřenými dveřmi obráběcího centra). V těchto případech je možno využít i jiných metod, které poslouží ke zvýšení jistoty při určení závady. Závadu mohou napomoci odhalit také snímače zatížení, které při provozu měří aktuální přetížení stroje (0% až 150%) a zobrazují ho na display.



Obr. 4 Display se zobrazením zatížením stroje Hermle C30U [Autor]

2.1 Technický, technologický a ekonomický význam

Zavedení údržby do výrobního procesu byl přirozený proces, který vedl k vytvoření nových technologií, metod a hodnocení údržby. Provozní spolehlivost je stanovena zajištěním bezporuchovosti a udržitelnosti údržby. To umožní pohotově reagovat na změny stavu zařízení, zvýší se bezpečnost i efektivnost provozu a prodlouží se životnost zařízení. Správné zavedení údržby a možnost strategického plánování a řízení údržby sníží společností náklady na údržbu i o 30%. Původní prostoje zařízení se mohou snížit až o 60%. První přínosy po zavedení údržby lze pozorovat zhruba za 8-12 měsíců.

Výhody technické diagnostiky z ekonomického hlediska:

- Maximalizace životnosti zařízení
- Minimalizace nákladů na provoz
- Minimalizace hrozby havárie
- Minimalizace odstávek údržby
- Minimalizace spotřeby energie

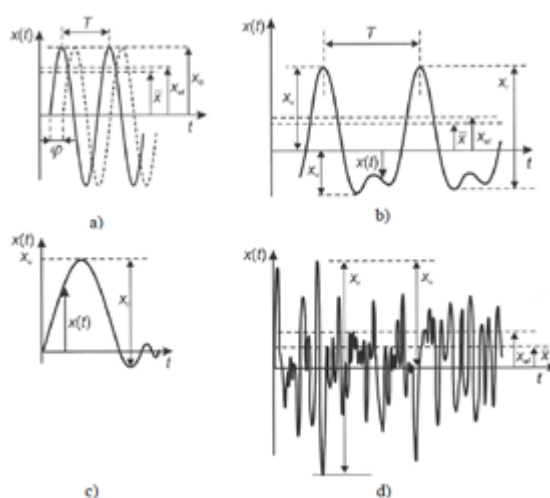
Hlavní přínosy lze později pozorovat ve:

- Zjednodušení činnosti obsluhy
- Propojení diagnostických výsledků a prognóz
- Zkvalitnění a rozšíření systému kontrol

Technická diagnostika je nutnou součástí konstrukčního procesu u společností, kterým záleží na výrobních nákladech a potřebují s určitou jistotou zaručit co nejdelší životnost stroje a bezporuchový stav.

3. Vibrodiagnostika

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal ze zdrojů [1], [3], [4]. Vibrace slouží k posouzení skutečného technického stavu zařízení. Mechanické kmitání je pohyb kdy sledované součásti konají pohyb kolem vlastní rovnovážné polohy. Dochází k nim u všech zařízení vykonávajících rotační pohyb. Dynamické namáhání stroje, špatný technický stav stroje, nevyvaha a nesouosost jsou hlavní příčinou vzniku vibrací. Průběh vibračního signálu dle času dělíme na: harmonické, složené periodické, přechodové a náhodné.



Obr. 5 Časové průběhy vibrací [4]

a) Harmonické b) Složené periodické c) Přechodové d) Náhodné

3.1 Snímače vibrací

Dva základní typy snímačů vibrací:

1. Snímače relativní výchylky (měření vibrační výchylky a střední polohy mezi rotujícími částmi)
2. Seismická zařízení (výstupem je míra absolutních vibrací)

Použití jiných typů snímačů, jako jsou tenzometry, není u diagnostiky tak časté. Použití správného typu snímače se odvíjí podle typu měření. Zda se měří rychlost, zrychlení nebo výchylka. Dále výběr snímačů ovlivňuje, zda měříme relativní nebo absolutní vibrace, jestli se jedná o měření běžných frekvencí nebo nízkofrekvenční měření.

Základní požadavky na snímače:

- Rezonanční kmitočet (výrazně vyšší než horní mezní kmitočet)
- Hmotnost (min. 10x menší než hmotnost měřené soustavy)
- Těžiště (snímač ideálně umístěn nad těžištěm vibrací)

Akcelerometry

Akcelerometr je seismické zařízení, generuje výstupní signál, který je úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení tělesa. Výhodou akcelerometru je, že jeho výstup může být zpracován dle potřeby na rychlost, zrychlení nebo výchylku vibrací. Akcelerometry se zpravidla montují na konstrukci stroje, která nerotuje. Montážní rezonanční frekvence akcelerometru je typicky od 1 kHz a více, ale jsou i pro jiné frekvence. Na trhu jsou dostupné různé velikosti akcelerometrů s velkým dynamickým a širokým frekvenčním rozsahem. Uvnitř se většinou nachází jeden či více piezoelektrických krystalů. Na krystal působí síla, vytváří se elektrický náboj, který je úměrný působící síle. Podle umístění krystalu ve snímači dělíme akcelerometry na smykové a tlakové.



Obr. 6 Akcelerometry použité při měření vibrací [Autor]

3.1.1 Připevnění snímačů

Pro ideální přenos pohybu na snímače je nutné správné připojení a umístění snímačů, ovlivňuje to výsledky měření. Dle podmínek měření, ekonomické a technické náročnosti volíme vhodný způsob uchycení snímačů. Při měření vysokých frekvencí se nejvíce projeví nesprávné uchycení snímačů. Způsoby uchycení snímačů:

- Připevnění permanentním magnetem
- Pevný šroubový spoj
- Přilepení tuhým lepidlem
- Izolovaný šroubový spoj
- Přilepení měkkým epoxidem
- Ruční sonda se snímačem



Obr. 7 Připevnění akcelerometrů pomocí magnetů [Autor]

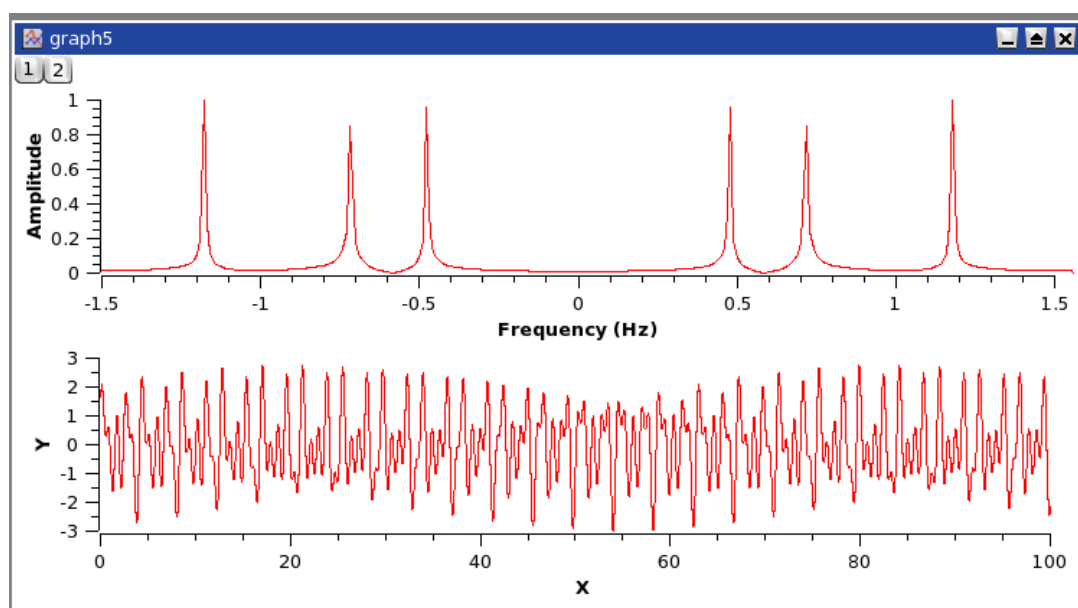
3.2 Základní metody vibrační diagnostiky

Kinematický pohyb nebo síla budí vibrace na strojních zařízeních, tím vzniká i hluk, mohou být ale taky samobuzeny díky změně parametrů. Technický stav stroje a stupeň opotřebení lze určit z pravidelnosti buzení. Modulační signál může být hlavní informací o signálu, který má nízký frekvenční rozsah oproti nosné složce frekvence- harmonické

složce základního signálu. Hlavním nástrojem vibrodiagnostiky je frekvenční analýza, existují ale i jiné metody.

3.3 Frekvenční analýza pomocí FFT

Rychlá frekvenční Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation) je nejpoužívanější analytická metoda. V průběhu měření vibračního signálu tato metoda vyhledá periodické děje, ty zobrazí ve frekvenčním spektru s přiřazením patřičné frekvence. Frekvenční spektrum je souřadný systém, ve kterém je na ose x frekvence a na ose y amplituda, u časového průběhu je na ose x čas. Výstup ve formě grafu a tabulek docílíme zaznamenáním a analyzováním naměřených hodnot frekvenčním analyzátozem. Vibrační signál měřený u strojů s periodickým pracovním cyklem je způsoben periodickými ději. Frekvenční rozklad zobrazuje velké množství sinusových signálů s amplitudou a počáteční fází.



Obr. 8 Ukázka Fast Fourier Transformation [12]

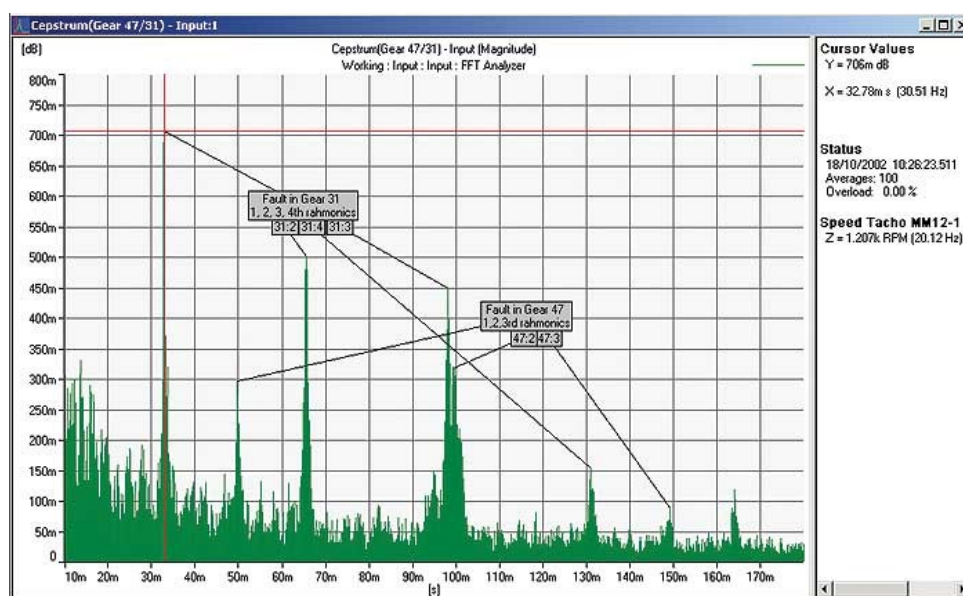
Výhodou FFT je přesnost a rychlost. Využití frekvenčního rozkladu při diagnostice technického stavu stroje je nezbytné, změny stavu stroje jsou v něm nejsnáze rozpoznatelné.

3.4 Obálková metoda (ENVELOPE)

Tato metoda je nejčastěji používána pro diagnostikování stavu ozubených kol a valivých ložisek. Vibrační signál s nízkou amplitudou a vyšší frekvencí vzniká při záběru ozubených kol a rotujících částí ložisek. Pro zkoumání vad ložisek jsou určeny základní vztahy, pomocí kterých jsme schopni určit frekvenci příslušné závady na ložisku. Například pokud je závada na vnitřní straně ložiska, prochází každý valivý člen ložiska poškozeným místem a dojde k malému ale opakujícímu se signálu s příslušnou frekvencí závady.

3.5 Kepstrální analýza

Metoda keprstrální analýzy spočívá v hledání periodických dějů ve frekvenčním spektru, hledají se opakující se rozdíly postranních frekvenčních čar. Tato metoda je uplatňována hlavně v případech, ve kterých jsou boční pásma a několik nosných frekvencí. Díky této metodě se ve spektru lépe orientujeme. Kepstrální analýza se používá pro diagnostiku ozubení, určení amplitudové a frekvenční modulae a pro diagnostiku převodovek.



Obr. 9 Ukázka keprstrální analýzy [13]

3.6 Diagnostika poruch obráběcích center

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal ze zdrojů [1]. Nesouosost a nevývaha bývají hlavní nežádoucí projevy špatného stavu, ustavení, nebo jiné závady stroje. Tyto nežádoucí projevy způsobují zvyšování hluku, vibrací a teploty součástí na stroji.

3.7 Nesouosost

Ustavení stroje je velmi důležité pro práci stroje, mechanické spojení hřídelů pomocí spojky musí být velmi přesné. Nesprávné ustavení stroje má za příčinu působení vynucených kmitů a sil, ty způsobí přídatná zatížení na hřídele, spojky, základy i ložiska. Při velké nepřesnosti mohou vznikat i trvalé deformace a únava materiálu.

- **Rovnoběžná nesouosost**

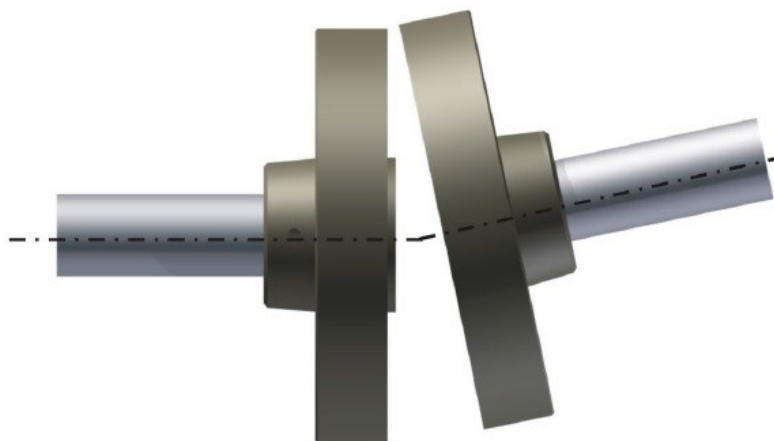
Vzniká díky přesazení hřídelů, projevuje se velkými radiálními vibracemi. Ve frekvenčním spektru dominuje druhá otáčková frekvence, která bývá větší než první. Při velkém přesazení, jsou ve frekvenčním spektru zobrazeny amplitudy se čtvrtým až osmým harmonickým násobkem.



Obr. 10 Rovnoběžná nesouosost-rovnoběžné přesazení [14]

- **Úhlová nesouosost**

Vzniká díky nerovnoběžnosti hřídelů, a pokud se osy rotací protínají. Způsobuje velké axiální vibrace, ve frekvenčním spektru se může projevit na první nebo druhé ale i třetí harmonické frekvenci.



Obr. 11 Úhlová nesouosost [14]

3.8 Nevývaha

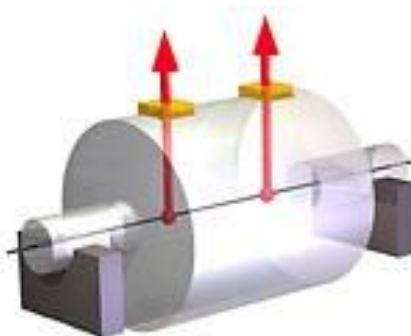
Hlavní příčina může být způsobena již při výrobě zařízení a to nesouměrně umístěnou hmotou mimo osu rotace. Vzniká mechanické kmitání, které může namáhat celý stroj. Je to jedna z nejběžnějších závad v praxi, při kterém je dynamicky namáhán stroj, což snižuje jeho životnost. Hlavní příčiny nevyváhy rotujících objektů dělíme na:

- Funkční
 - Deformace nebo uvolnění rotoru
 - Nerovnoměrné opotřebení rotoru
 - Kinetické příčiny
- Výrobní a montážní
 - Trvalá deformace součástí
 - Neobrobené plochy
 - Nerovnoměrná hustota materiálu součástí
 - Nekruhovitost ložiskových čepů
 - Výrobní úchytky

Hlavním cílem vyvažování je přiblížení osy těžiště co nejvíce k ose rotace, tím se docílí lepší rozložení hmoty rotujících částí a otáčení v uložení je bez působení odstředivých sil. Odstředivé síly kvůli nevyvážkům se projevují vibracemi a hlukem, to má za následek snížení životnosti ložisek, zvýšení dynamického namáhání, zhoršení funkcí stroje až do případné havárie. Nevyváženost rozdělujeme podle druhu a umístění nevyvážku na tři základní druhy.

- **Statická nevyváženost** (těžký bod, chyba v těžišti)

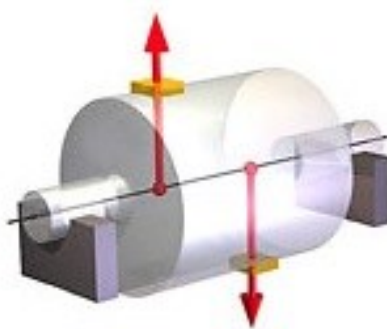
Vyvažování se provádí pouze v jedné vyvažovací rovině.



Obr. 12 Statická nevyváženost [15]

- **Momentová nevyváženost**

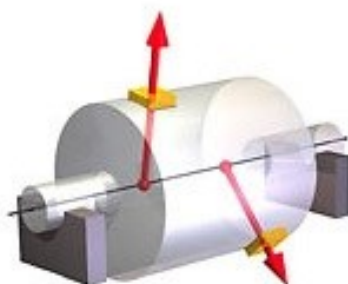
Hlavní osa setrvačnosti svírá s osou otáčení úhel a zároveň ji protíná v ose těžiště rotoru. Momentovou nevyváženost nezměříme při klidovém stavu, tak jako u statické nevyváženosti.



Obr. 13 Momentová nevyváženost [15]

- **Dynamická nevyváženost**

Kombinace statické a momentové nevyváhy mají za vinu výrobní tolerance. Hlavní osa setrvačnosti protíná osu rotace mimo těžiště. V praxi je výskyt dynamické nevyváženosti velmi častý. Vyvažování se provádí v několika rovinách a nejdříve se vyváží statická a potom dynamická nevyváha.



Obr. 14 Dynamická nevyváženost [15]

4. Tribodiagnostika

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal ze zdrojů [5], [6]. Tribodiagnostika je jedna z metod bezdemontážní technické diagnostiky. Pomocí tribodiagnostiky zjistíme stav stroje, které ještě nemusí jevit známky poškození. Na základě tribodiagnostiky lze stanovit harmonogram oprav a tím docílit spolehlivého chodu stroje. Tribodiagnostika dopomáhá udržet oleje v čistém a provozu vhodném stavu. Pro určení celkového stavu obráběcího centra na základě tribodiagnostiky by měly být provedeny alespoň tyto zkoušky:

- Obsah vody
- Číslo kyselosti TAN
- Měření kinematické viskozity
- Obsah mechanických nečistot
- Atomová spektrometrie

Tyto zkoušky pomohou k určení stavu stroje a měly by být prováděny pravidelně dle tribodiagnostického plánu. Ne vždy je možno odebrat hydraulický, převodový a řezný olej. V takovýchto případech je vhodné použití více metod technické diagnostiky.

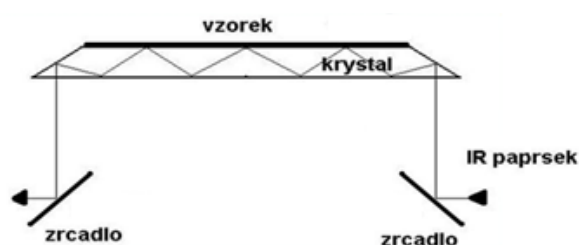
4.1 Odběr vzorků

Pro odběr vzorků je obecně nezbytné dodržovat následující pravidla:

- Vzorek po odebrání nesmí být kontaminovaný nečistotami
- Vzorek musí reprezentovat celou olejovou náplň
- Odběr vzorku se provádí při provozu stroje nebo těsně po ukončení provozu
- Obsah vzorkovnice je 500 ml, jsou vyrobeny z polyetylénu a na základě prováděných zkoušek je nutno odebrat příslušné množství oleje, nejméně alespoň 250 ml
- Vzorek musí být správně a řádně označen (Název firmy, stroje, mazací místo, datum a čas odběru, doba provozu stroje)

4.2 Spektrální analýza

Optická nedestruktivní analytická metoda neboli infračervená spektrometrie je využívána pro spektrální analýzu. Je to metoda molekulové spektrometrie, infračervené záření je v interakci s molekulami a způsobuje jejich excitaci na vyšší vibrační hladiny. Dojde k pohlcení záření s hodnotami energie a to má za následek vzniku vibračních absorpčních pásem ve spektru. Každé sloučenině lze přiřadit odpovídající pásmo ve spektru, lze je pak identifikovat. Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FT-IR) je oproti infračervené spektrometrii citlivější, má o dva řády vyšší průchod energie a mnohem větší poměr signálu k šumu. Díky tomu lze získat vysoce kvalitní spektra.



Obr. 15 Princip metody FT-IR [Autor]

Dno nádobky je tvořeno z krystalu selenidu zinečnatého (ZnSe), na který se nanese tenká vrstva zkoušeného oleje (kapaliny). Při zkoušce se záření odráží v krystalu a proniká i do vzorku do hloubky 1-2 μm . Vzorek absorbuje část záření vlnových délek, které odpovídají složení vzorku. Odrazů bývá 10-12 s konstantní dráhou paprsku. Touto metodou lze během krátké doby stanovit obsah vody, úbytek přísad, obsah oxidačních a nitračních produktů.



Obr. 16 Spektrometr Nicolet Impact 410 [Autor]

4.3 Rentgenová spektrometrie

Tato metoda zjišťuje kvantitativní a kvalitativní složení daného vzorku oleje. Lze provádět více prvkové analýzy hlavních i stopových koncentrací prvků. Vysoká citlivost i přesnost měření, zkouška jednoho vzorku trvá přibližně 20 minut. Zdrojem rentgenového záření je rentgenová lampa (rentgenka). Rentgenové záření po dopadu na vzorek vybudí a vytrhne elektron ze slupky atomů jednotlivých prvků, dojde k zaplnění vakancí ve slupce přeskokem elektronu ze slupky vyšší. Energetický rozdíl je vyzářen jako fluorescenční tok fotonů sekundárního rentgenového záření, to odpovídá přechodu elektronu na hladinu. Prvkové složení vzorku se zjistí měřením intenzity spektrálních čar.



Obr. 17 Rentgenový spektrometr Xepos-XRF [Autor]

4.4 Refraktometrie

Refraktometrie využívá refraktometr, který je určen pro měření vlastností kapaliny (oleje) pomocí lomu světla. Refraktometry se liší hlavně stupnicemi, na kterých se dají měřené veličiny přímo odečíst, nebo je nutné odvození ze stupnice (hustota kapaliny, refrakční index RI, a jiné). Refraktometr má zešíkmenou plochu krystalu, na kterou se nanese pár kapek zkoušené kapaliny a přiklopí se víčko. Je nutné, aby byla kapalina po celé ploše rozprostřena. Refraktometr se namíří proti světlu a v okuláru se zobrazí modro bílé prostředí, hranice modré a bílé určuje na stupnicích odečítanou hodnotu.



Obr. 18 Refraktometr RHAN-503ATC s pohledem do okuláru [Autor]

Refraktometry nachází využití především v automobilovém průmyslu při měření bodu tuhnutí směsi do ostřikovačů a kondice elektrolytu autobaterie. Další využití nachází v potravinářském a strojním průmyslu, ale i ve zdravotnictví rostlinné výrobě a v jiných průmyslech. Cena refraktometru není vysoká, na trhu jsou i digitální kapesní verze.

5. Termodiagnostika

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal ze zdrojů [7], [8]. Dnes je termodiagnostika naprosto nepostradatelným nástrojem technické diagnostiky při multiparametrickém přístupu. Bezkontaktní a kontaktní měření jsou nejčastější metody termodiagnostiky. Monitorujeme technický stav stroje během provozu i konkrétní teploty materiálů objektů. Bezkontaktní metoda využívá měření povrchu pomocí termografických kamer, ty pracují na principu využívání infračerveného spektra elektromagnetického záření v oblasti vlnových délek od 0,4 μm do 25 μm vyzařované povrchem tělesa.

5.1 Teplota

Teplota patří mezi nejdůležitější stavové veličiny, určující stav termodynamické rovnováhy. Termodynamická teplota charakterizuje stav termodynamické rovnováhy. Teplotu nelze měřit přímo, ale prostřednictvím dalších fyzikálních veličin, jedná se o nepřímé měření. Termodynamická teplotní stupnice je definována pomocí vratného Carnotova cyklu. Absolutní nula určuje počátek termodynamické stupnice. Základní jednotkou termodynamické stupnice je Kelvin (K). Kelvin byl určen zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody, je to rovnovážný stav tří skupenství vody. Tato hodnota byla stanovena $T = 273,16 \text{ K}$. Odvozením z Kelvinovy stupnice vznikla teplotní stupnice Celsiova, její jednotkou je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Celsiova teplota t je rovna rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K, platí tedy:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K}$$

Pro správné určení teploty je využívána závislost správně zvolených fyzikálních veličin na teplotě. Délkové rozměry, objem kapalných a pevných těles, tlak plynů a další patří mezi nejčastěji používané teplotně závislé veličiny.

5.2 Bezkontaktní měření a teploměry

Bezkontaktní měření povrchové teploty probíhá na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem záření. Oblast záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm je označována jako tepelné záření. Měření teplot v rozsahu -40°C až $+10000^{\circ}\text{C}$.

Výhody bezkontaktního měření:

- Možnost měřit velmi rychlé změny teplot
- Měření z bezpečné vzdálenosti
- Možnost měření teploty u rotujících součástí
- Malý vliv měřicí techniky na měřený objekt

Nevýhody bezkontaktního měření:

- Nejistoty měření z neznalosti správné hodnoty emisivity povrchu tělesa
- Nejistoty měření způsobené nesprávnou korekcí odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt
- Neznalost správné hodnoty prostupnosti mezi čidlem a objektem způsobující nepřesnosti v měření

5.2.1 Pyrometry

Využívají k měření teploty tepelné záření v různých oblastech spektra.

- Úhrnné pyrometry (složitá korekce údajů, používají se především pro měření teploty zářičů blízkých černým zářičů)
- Monochromatické pyrometry (jasové, využívají úzkého spektrálního pásma, princip měření je v porovnávání jasu)
- Pásmové pyrometry (měří teplotu prostřednictvím záření v úzkém pásmu vlnových délek)
- Poměrové pyrometry (vyhodnocení povrchové teploty na základě poměru dvou září pro dvě různé vlnové délky)

5.2.2 IR kamery

Termografie zahrnuje metody pro zkoumání teplotních polí na povrchu těles, to je reprezentováno energií a hustotou fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa. IR termokameru lze využít při vyhledávání poruch během běžného provozu i během servisu a údržby. Dnes je na trhu velké množství IR termokamer s vysokým rozlišením, jednoduchou obsluhou, korekcí emisivity, kompenzací odražené teploty a rychlým zaostřením. Kamery jsou lehké, odolné vůči pádu, prachu a vodě.



Obr. 19 Průmyslová IR-termokamera Fluke Ti32 [Autor]

IR-termokamerou lze sledovat celý stroj, hlavní část měření se ale zaměřuje na rozvaděče, chlazení stroje a elektroinstalaci.

Výhody použití IR-termokamery:

- Lze měřit celé povrchy těles
- Lze měřit vysoké teploty
- Lze měřit pohybující se objekty

Nevýhody použití IR-termokamery:

- Na měřený objekt musí jít přímo vidět
- Měří se pouze povrchová teplota
- Nejistota měření (lidský faktor)

6. Praktické provedení měření

Měření probíhalo ve firmě Ray Service a.s. na 5osém obráběcím centru Hermle C30U. Pro zhodnocení stavu stroje byl zvolen multiparametrický přístup, použitím metod vibrodiagnostiky, tribodiagnostiky a termodiagnostiky. Vibrodiagnostická měření byla provedena v rozestupu 2 měsíců.

6.1 Obráběcí centrum Hermle C30U

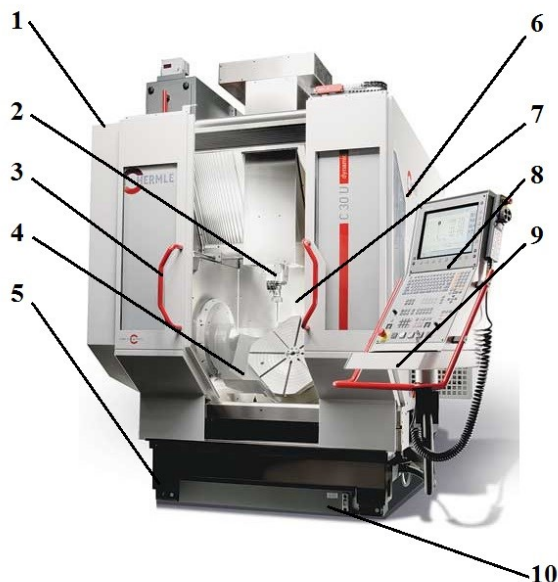
Obráběcí centrum slouží především k obrábění hliníkových slitin, z důvodu snížení výrobních časů se po většinu času na stroji hrubuje. Obrábí se především hliníkové boxy. Obráběcí centrum chladí nástroje řeznou kapalinou, která je míchána z řezného oleje Motorex SwissCool 7755 Aero, která je určena pro obrábění hliníkových slitin. Na tomto stroji proběhla v listopadu 2016 výměna elektromotoru a vřetene z důvodu zadření ložisek, bohužel se měření uskutečnilo až po této poruše. Stroj je schopen zobrazovat aktuální zatížení stroje v %.



Obr. 19 Obráběcí centrum Hermle C30U ve společnosti Ray Service a.s. [Autor]

6.1.1 Základní parametry obráběcího centra

Popis základních částí stroje lze vidět na obrázku 20, parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 20 Obráběcí centrum Hermle C30U [11]

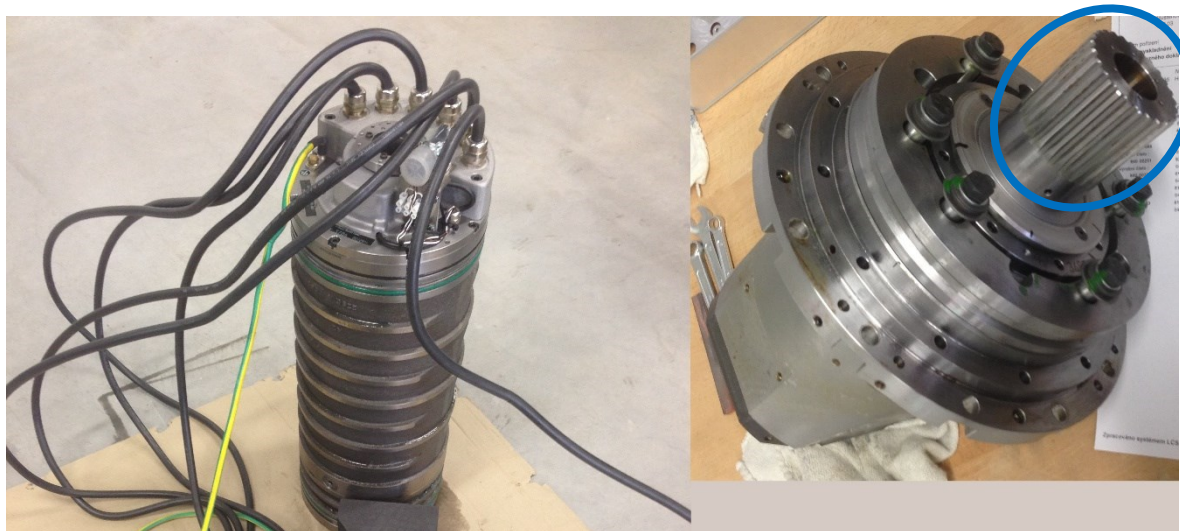
- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Skříňový rozváděč | 6. Vkládací stanice nástrojového zásobníku |
| 2. Vřeteno frézky | 7. Krytka nástrojového zásobníku |
| 3. Ochranná kabina | 8. Ovládací pult |
| 4. Naklápěcí otočný stůl | 9. Psací deska |
| 5. Lože stroje | 10. Záchytný zásobník třísek |

Tab. 1: Parametry obráběcího centra Hermle C30 U

Hermle C30 U	
Max. výkon	15 kW
Rozsah otáček	20 ÷ 18000 ot/min.
Kroutící moment	130 Nm
Upínací plocha	Ø 630mm , □ 540 mm
Max. zatížení otočného stolu	1000 Kg
Hladina akustického	98 dB
Posuvná síla posuvu	7000 N
Zásobník na nástroje	až 32 nástrojů

6.1.2 Výměna elektromotoru a vřetene

V listopadu roku 2016 proběhla po poruše a odstavení stroje výměna elektromotoru a vřetene na stroji. Podle zjištěných informací došlo k zadření ložisek, více informací k poruše není k dispozici. Před touto poruchou nebyly provedeny měření, nemohu tedy porovnat stav před a po výměně. Elektromotor i vřeteno je uloženo a zakrytováno v litinovém šasi, jak vypadá elektromotor i vřeteno je možno vidět na obrázku 21.



Obr. 21 Elektromotor a vřeteno během výměny [Autor]

Na obrázku 21 lze vidět spojení vřetene s elektromotorem. Informace o přesném typu elektromotoru nelze získat.

7. Vibrodiagnostické měření

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal z norem [9]. Měření vibrací na stroji probíhalo těsně po dokončení práce na obrobku. Nebylo možné provést měření přímo během práce na stroji z bezpečnostních důvodů. Stroj nelze uvést do chodu při otevřených ochranných dveřích. Analyzátor byl tedy umístěn uvnitř kabiny a snímače upevněny na vřeteno, měření bylo spuštěno a dveře kabiny byly zavřeny, až poté byl stroj uveden do chodu. Měření otáček probíhalo od 500 ot/min. až do 18000 ot/min, což jsou maximální otáčky stroje. Během měření byl ve vřetenu vždy upnut nástroj, vřeteno bylo v takové poloze, aby nedošlo k poškození analyzátoru a kabely od snímačů byly dostatečně daleko od rotujícího nástroje. Měření bylo provedeno pomocí analyzátoru Adash A4400-VA4 Pro.

7.1 Analyzátor Adash A4400-VA4 Pro

Jedná se o nejvýkonnější 4kanálový analyzátor pro provádění vibrodiagnostiky strojů. V přístroji jsou obsaženy moduly rekordéru, datakolektoru a analyzátoru měřených signálů. Pomocí přístroje je možno vyvažovat stroje, provádět měření ultrazvuku, rozběhů a doběhů, rázové testy akustické měření a další. Obsažen je také expertní systém pro automatickou detekci poruch, tuto funkci ale nevyužívám. K tomuto přístroji je možné použít pro analýzu naměřených dat i software A4410 Virtual Unit, který má stejné prostředí jako Adash A4400-VA4 Pro.



Obr. 21 Analyzátor Adash A4400-VA4 Pro [Autor]

Tab. 2: Technické parametry analyzátoru Adash A4400-VA4 PRO

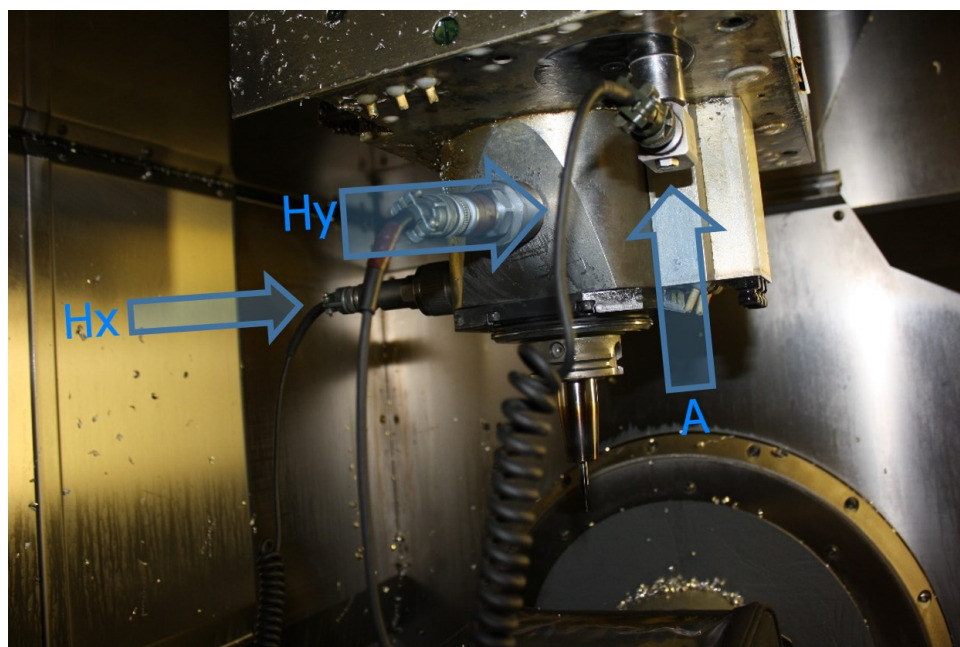
Režimy měření	Analyzátor, sběrač dat, vyvažování, rozběhy, rekordér, rozběhy/doběhy, rázový test, ultrazvuk a další
Vstupní kanály	4 AC, 4 DC, 1 TACHO
Rozlišení FFT	Min. 100 čar, Max. 3 276 800 čar
Procesor	Intel Atom 1,6 GHz
Paměť	120 GB
Rekordér signálu	Vzorkovací frekvence 64 kHz
Provozní teplota	-10°C až +50°C
Zpracování dat	FFT v reálném čase, ENVELOPE analýza, ACMT analýza, měření otáček, měření orbit



Obr. 22 Prostředí softwaru A4410 Virtual Unit [Autor]

7.2 Druh a uchycení snímačů

Při měření na stroji byly použity akcelerometry AC102-1A, výhodou je možnost zpracování výstupu na více veličin. Výstup může být zpracován jako zrychlení, rychlost, nebo výchylky vibrací.



Obr. 23 Uchycení snímačů permanentním magnetem na vřetenu [Autor]

Tab. 3: Vlastnosti snímače AC 102-1A

Citlivost ($\pm 10\%$)	100mV/g
Frekvenční rozsah ($\pm 3\%$)	0,5 - 15000 Hz
Vnitřní odpor	100 Ω
Hmotnost	90 g
Zdroj napětí	18 - 30 V
Rezonanční frekvence	23
Pracovní rozsah teplot	-50 – 120 °C

Připevnění pomocí permanentního magnetu snižuje rezonanci snímače asi na 7kHz. Před zahájením měření bylo nutné očistit měřicí místa od mastnoty a nečistot, tím zaručím ideální přenos mezi snímačem a povrchem stroje. Připevnění snímačů proběhlo bez větších problémů, snímač v axiálním směru bylo nutné uchytnit k povrchu šasi vřetene. Při prvním i druhém měření byla snaha umístit snímače do stejného místa. Při měření nebyly měřeny otáčky pomocí trigeru z důvodu uzavření bezpečnostních dveří.

7.3 Hodnocení vibrací

Při vyhodnocování vibrací je směrodatná norma ČSN 200065 z roku 1992. Tato norma určuje pásma hodnot vibrací, podle kterých se určí stav stroje.

Tab. 4: Pásma rozhodující o stavu stroje

Pásma A (velmi dobrý stav)	Oblast hodnot nového stroje
Pásma B (provozní stav)	Provoz bez poruch
Pásma C (přechodně přístupný stav)	Zvýšené hodnoty vibrací
Pásma D (nepřípustný stav)	Neschopnost provozu, nebezpečí havárie

Na základě normy a zkušeností jsem se nechal inspirovat a určil hranice pásem.

Tab. 5: Hranice pásem pro obráběcí centra

A/B	0 - 0,6 mm/s	Do 2 g
B/C	0,6 - 1,8 mm/s	Do 4 g
C/D	1,8 mm/s a více	Od 4 g

7.4 Analýza naměřených hodnot

Pro analýzu dat byl použit software A4410 Virtual Unit od společnosti Adash. Pomocí tohoto softwaru byly analyzovány celkové vibrace pro všechny měřené kanály, obálková metoda a frekvenční analýza. Pro určení frekvencí budících zdrojů je nutno dopočítat otáčkovou frekvenci dle vzorce pro všechny měřené otáčky.

Otáčková frekvence:

$$f_o = \frac{RPM}{60} = \frac{500}{60} = 8,33 \text{ Hz}$$

7.4.1 První měření

Nejprve je třeba dopočítat otáčkové frekvence pro všechny měřené otáčky dle vzorce, pro správné analyzování dat je to nezbytné. Otáčkové frekvence jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6: Otáčkové frekvence pro všechny měřené otáčky

Otáčky (ot/min)	500	1000	1500	2000	2500	3000	6000	9000	12000	15000	18000
Otáčková frekvence (Hz)	8,3	16,6	25	33,3	41,6	50	100	150	200	250	300

Dle normy byly posouzeny hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací. Měření bylo rozděleno do dvou a to na měření s nízkými otáčkami (500-2500 ot/min) se zvyšováním otáček po 500 ot/min a s vysokými otáčkami (3000-18000 ot/min) se zvyšováním otáček po 3000ot/min.

Tab. 7: Rychlost a zrychlení vibrací pro nízké otáčky

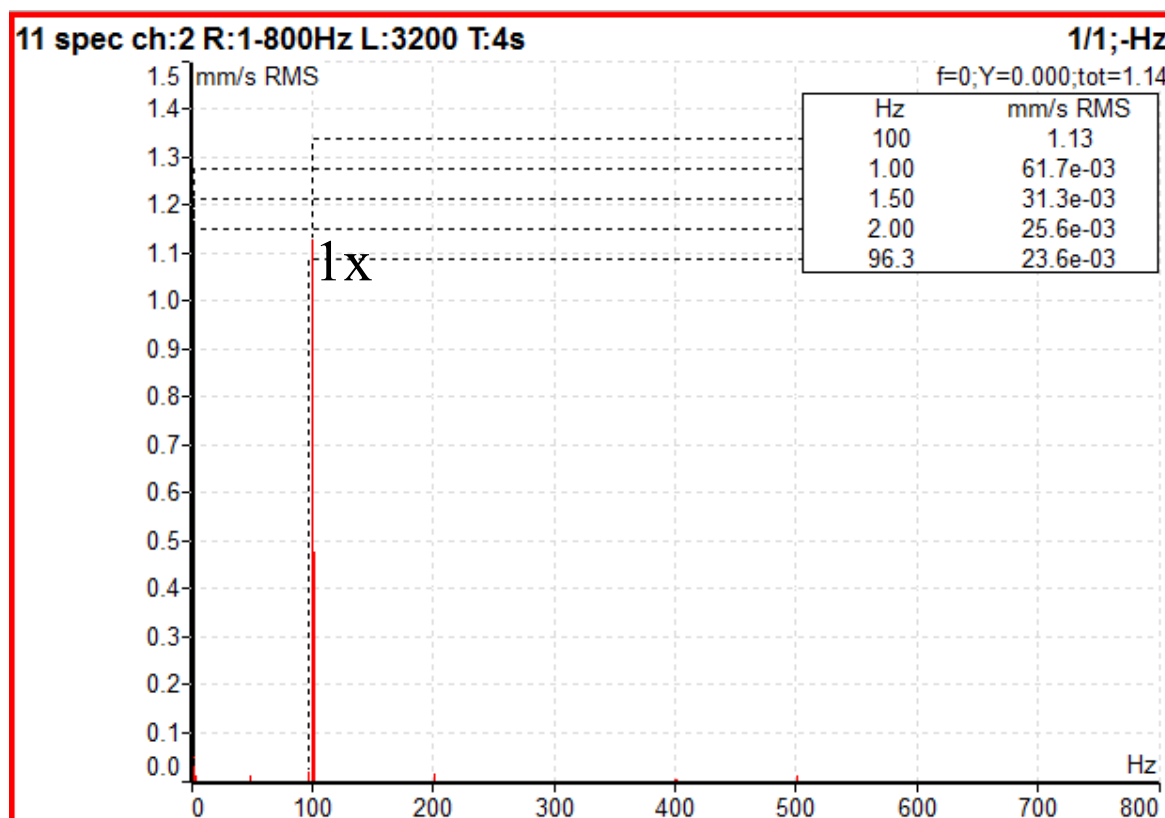
1. Měření - nízké otáčky (500-2500 ot/min)															
Otáčky [ot/min]	500			1000			1500			2000			2500		
Osy snímačů	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A
Rychlost [mm/s]	0,051	0,041	0,032	0,071	0,047	0,042	0,074	0,066	0,054	0,08	0,066	0,024	0,062	0,041	0,028
Zrychlení [g]	0,077	0,072	0,154	0,134	0,105	0,178	0,206	0,161	0,197	0,295	0,250	0,282	0,398	0,308	0,243

Hodnoty v tabulce 7 pro rychlost i zrychlení vibrací odpovídají všem pásma A, což je velmi dobrý stav stroje. Hodnoty jsou malé a v malém rozpětí, ani jedna z hodnot se nepřibližuje hranici pásma A/B. Zvyšující hodnoty zrychlení odpovídají zvyšujícím se otáčkám, tento nárůst není alarmující.

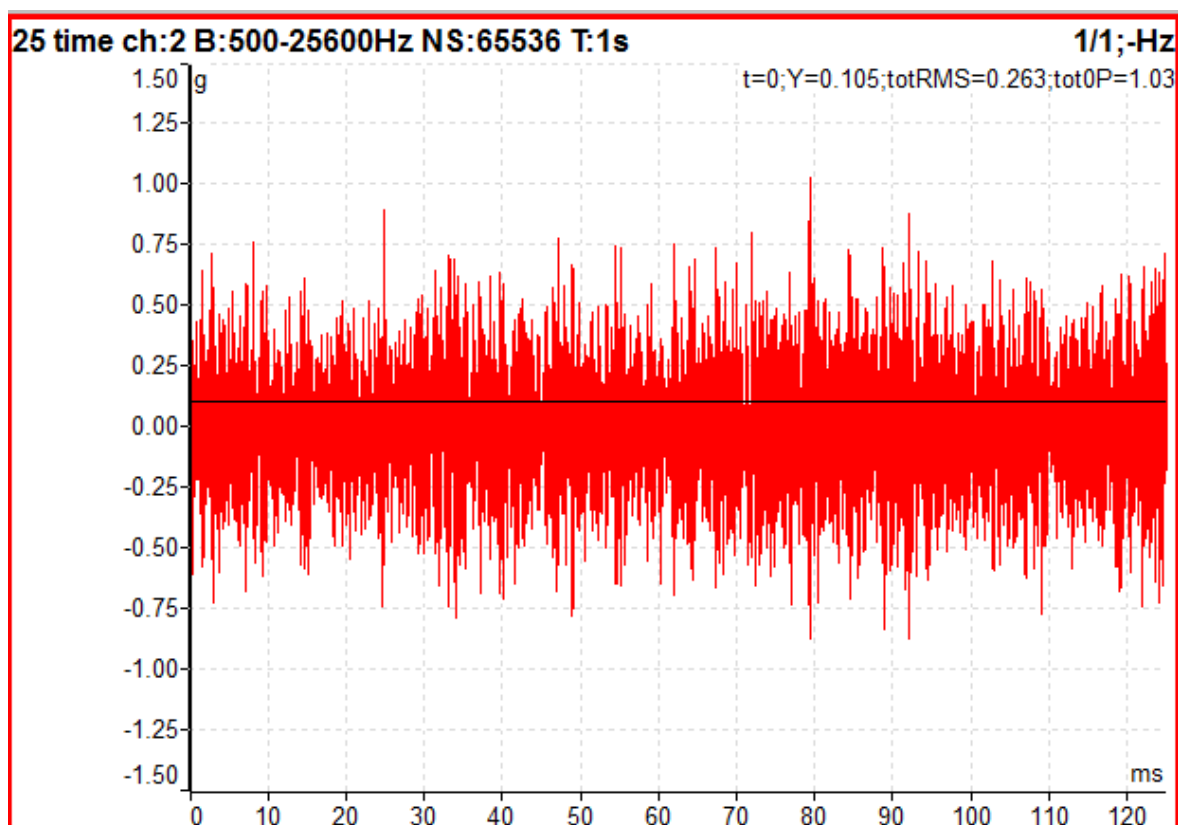
Tab. 8: Rychlost a zrychlení vibrací pro vysoké otáčky

1. Měření - vysoké otáčky (3000-18000 ot/min)																		
Otáčky [ot/min]	3000			6000			9000			12000			15000			18000		
Osy snímačů	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A
Rychlost [mm/s]	0,025	0,033	0,012	0,108	1,15	0,233	0,188	0,328	0,063	0,37	0,495	0,08	0,521	0,638	0,097	2,24	0,904	0,144
Zrychlení [g]	0,274	0,227	0,249	0,248	0,247	0,182	0,465	0,369	0,319	0,418	0,321	0,493	0,352	0,378	0,708	0,557	0,595	0,624

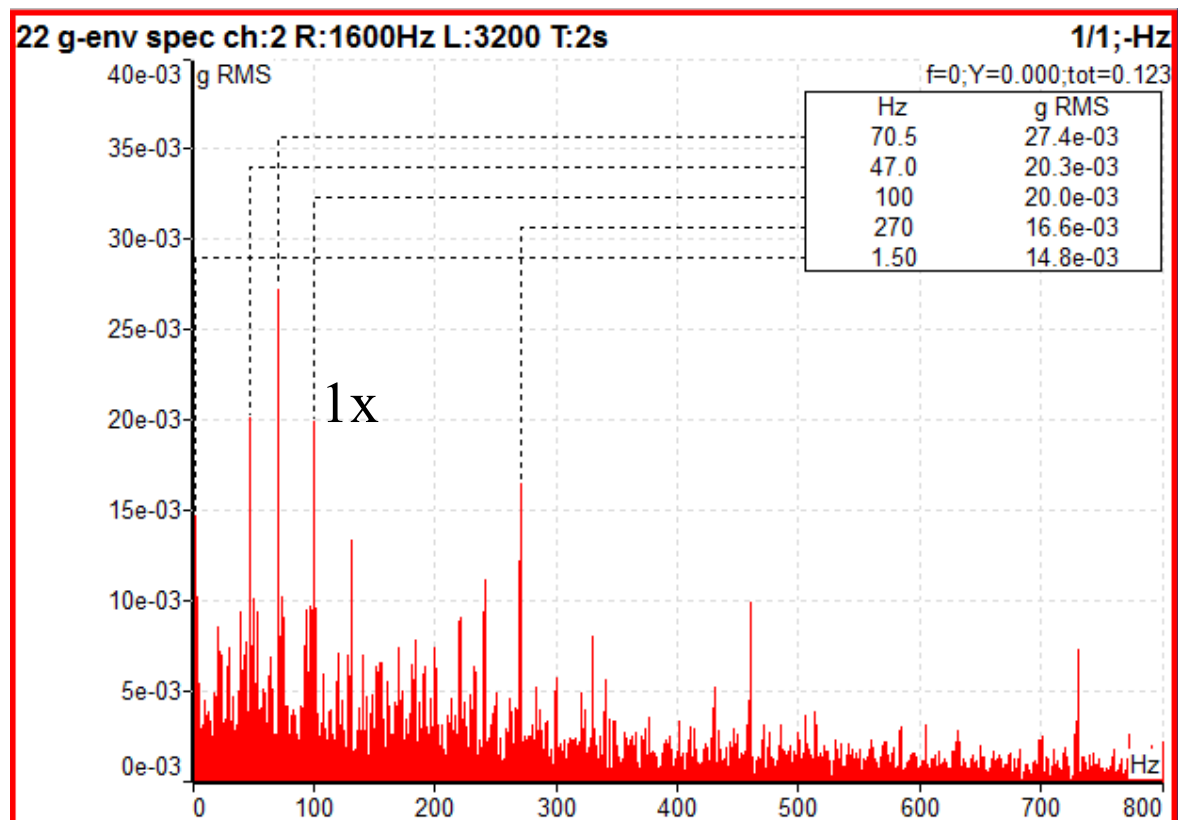
Při měření větších rychlostí byly naměřeny zvýšené hodnoty vibrací, hodnoty zrychlené se příliš nemění. Pozornost je třeba věnovat 6000, 15000 a 18000 ot/min. U těchto otáček byla naměřena zvýšená hodnota rychlosti vibrací, které se nacházejí v pásmu B/C, u 18000ot/min je hodnota rychlosti vibrací 2,24 mm/s což odpovídá pásmu C/D. Všechny hodnoty v axiálním směru jsou minimální, to může být způsobeno umístěním snímače.



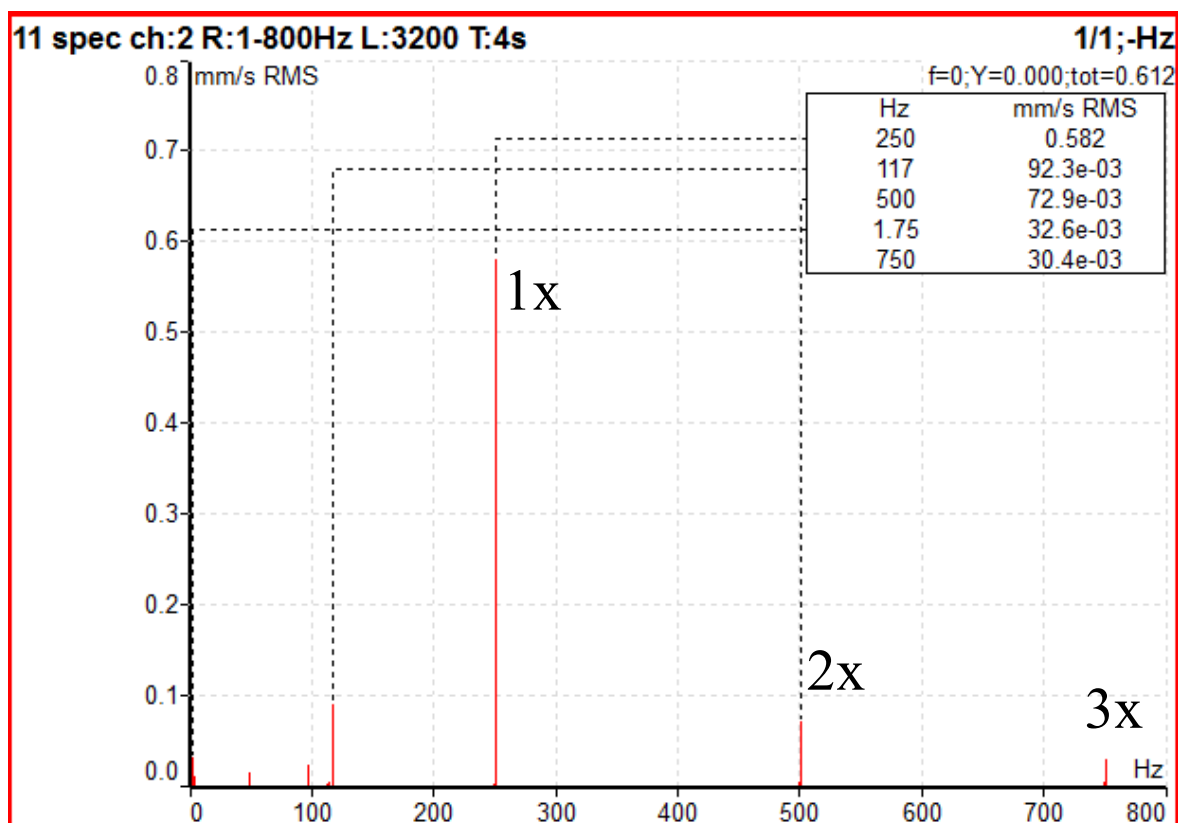
Obr. 24 Frekvenční analýza s vyznačenou první otáčkovou frekvencí odpovídající 100 Hz s projevem nevývahy v horizontálním směru Hy pro 6000 ot/min



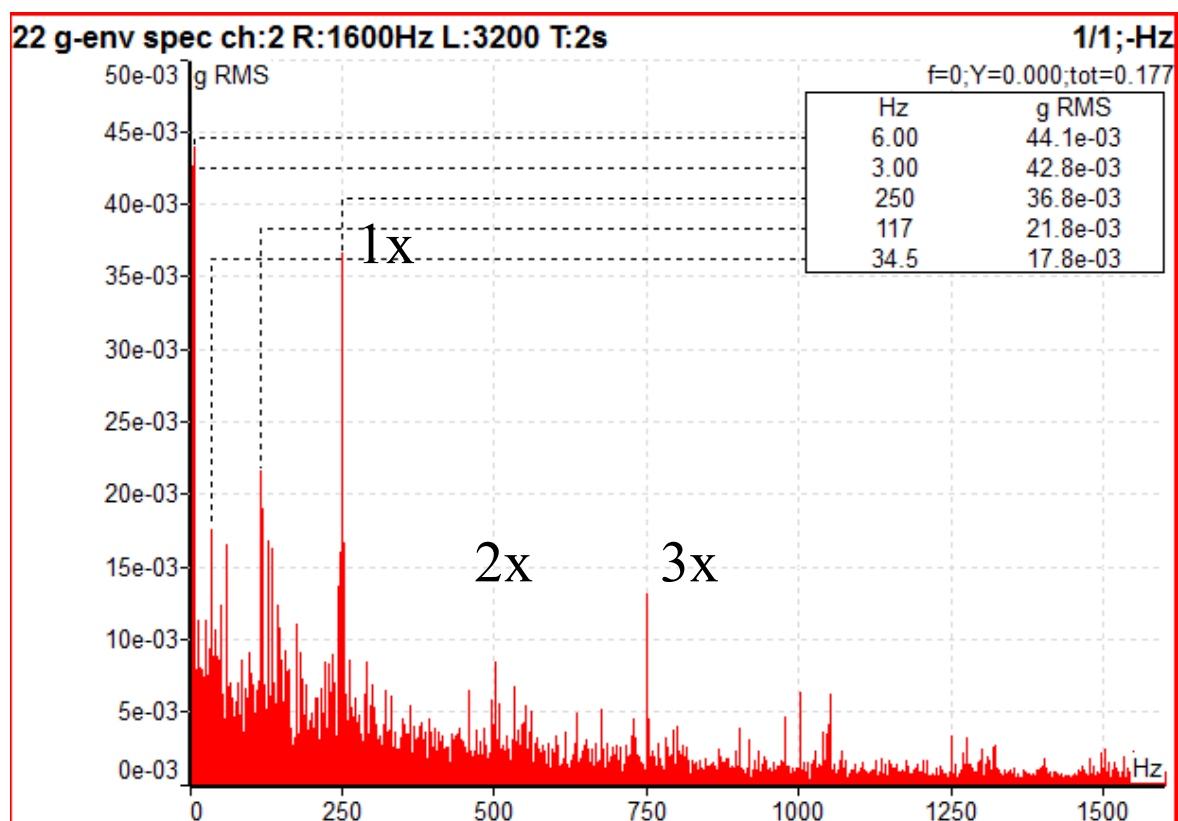
Obr. 25 Časový záznam efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve směru horizontálním Hy pro 6000 ot/min



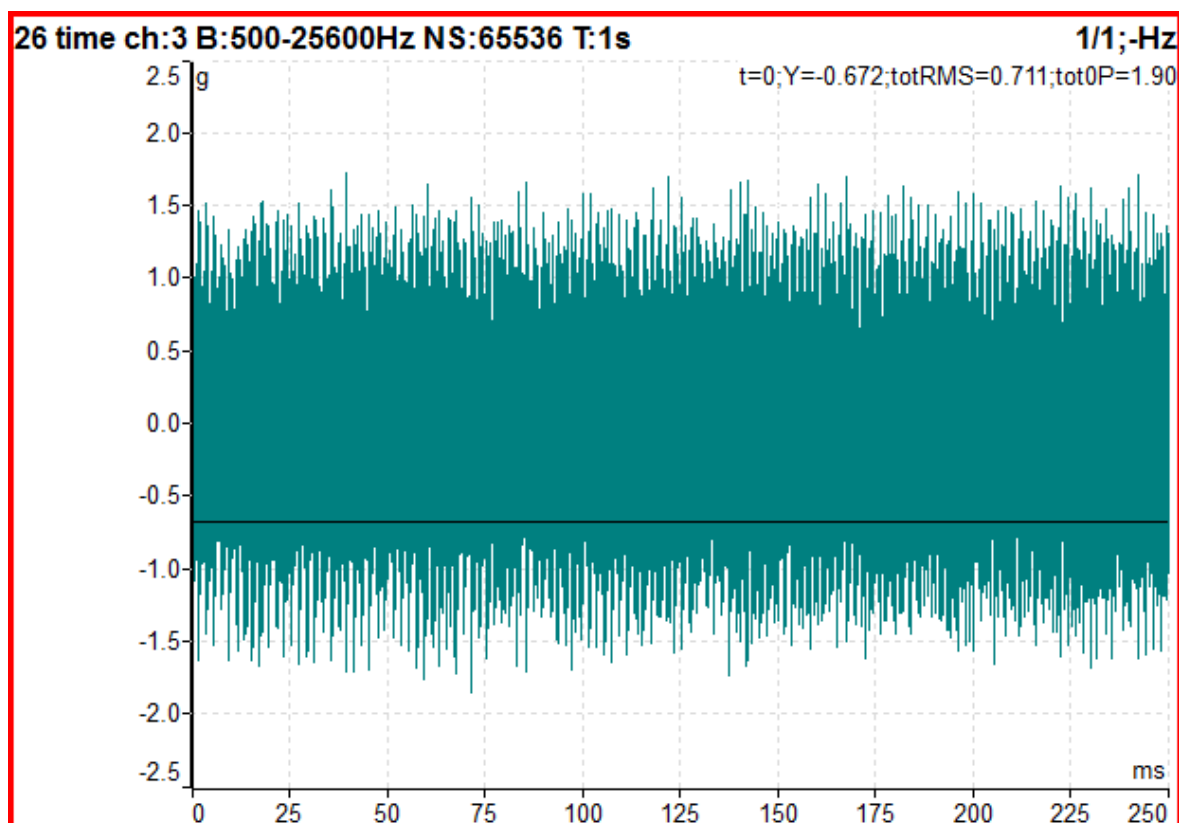
Obr. 26 Obálková metoda se zvýrazněním první otáčkové frekvence odpovídající 100 Hz pro 6000 ot/min



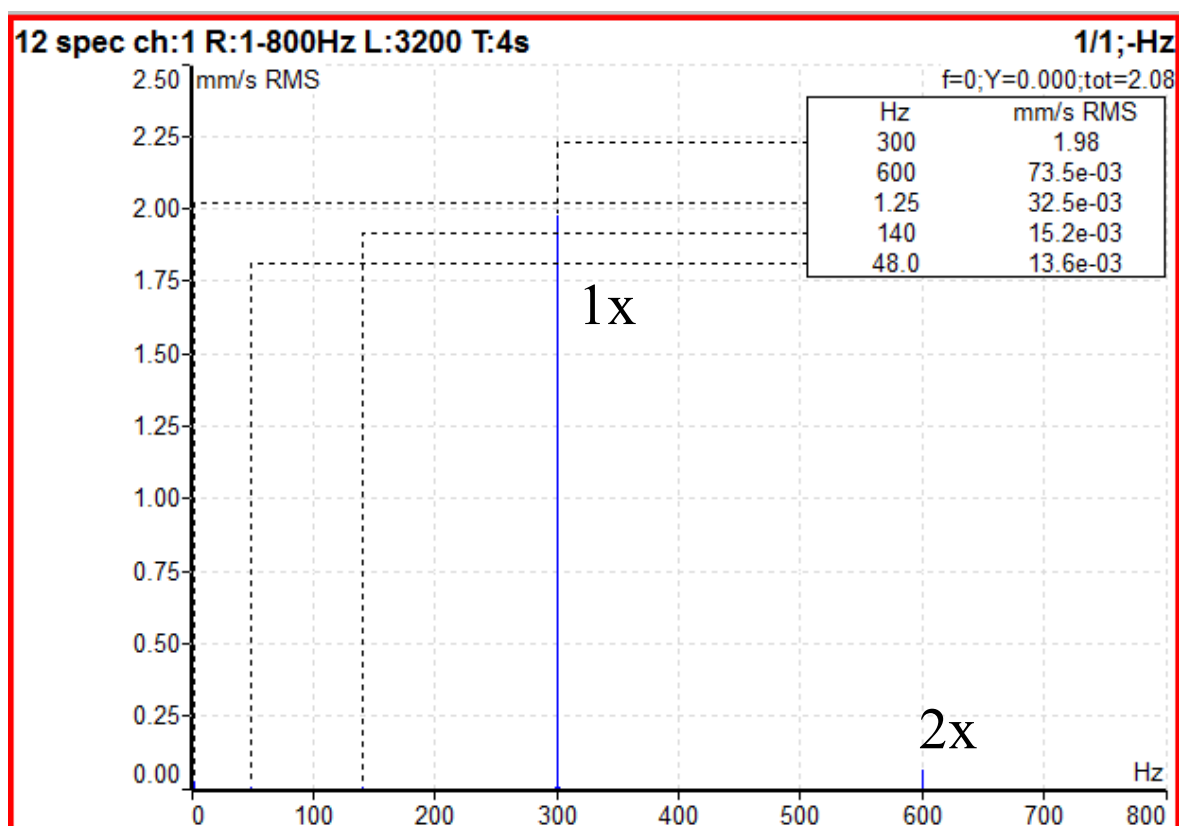
Obr. 27 Frekvenční analýza v horizontálním směru Hy s výraznou první otáčkovou frekvencí odpovídající 250 Hz a jejími násobky pro 15000 ot/min



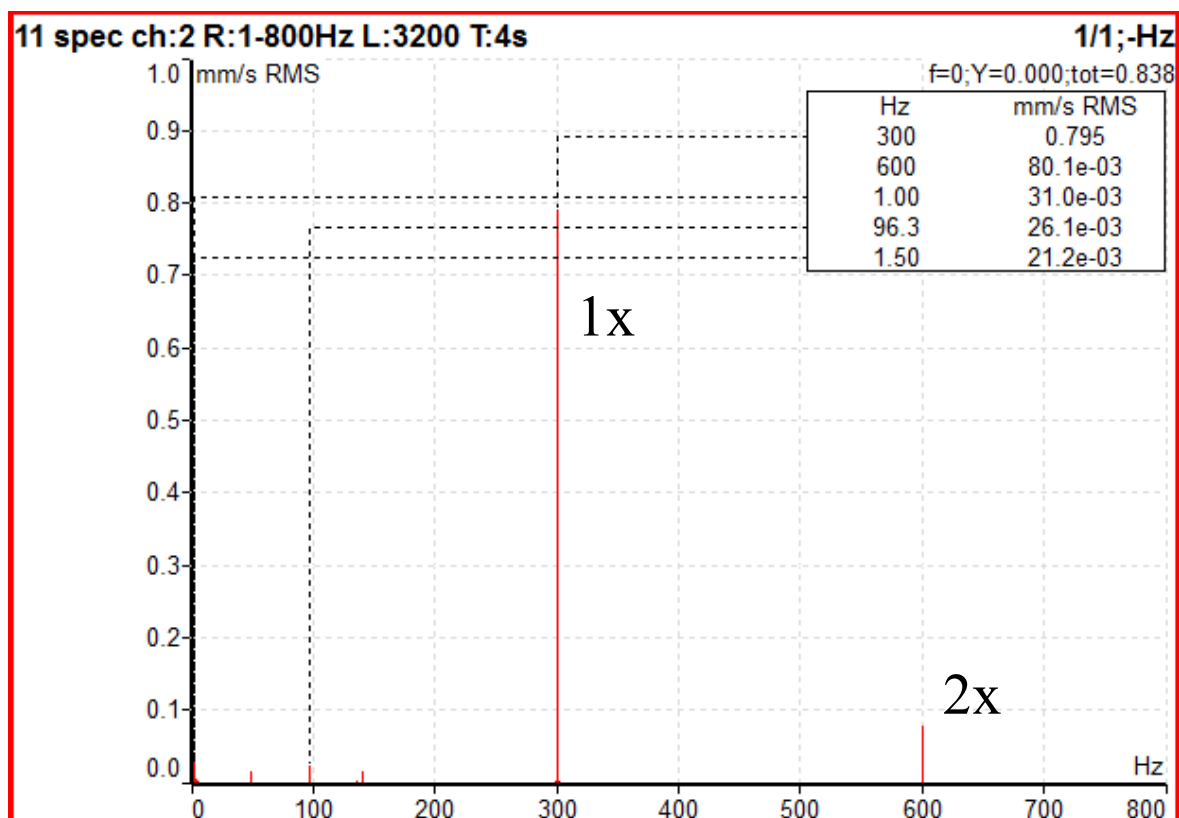
Obr. 28 Obálková metoda se zvýrazněnou první otáčkovou frekvencí odpovídající 250 Hz a jejími násobky pro 15000 ot/min



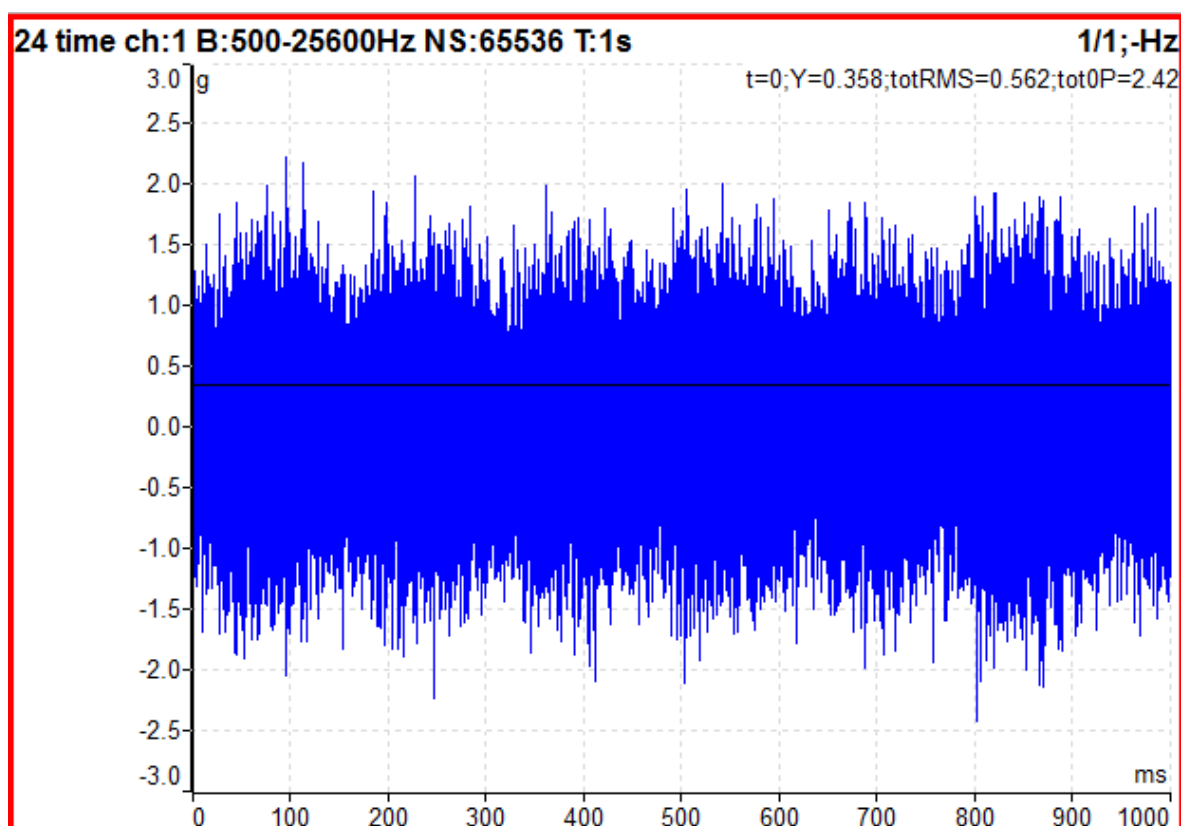
Obr. 29 Časový záznam efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve směru axiálním pro 15000 ot/min



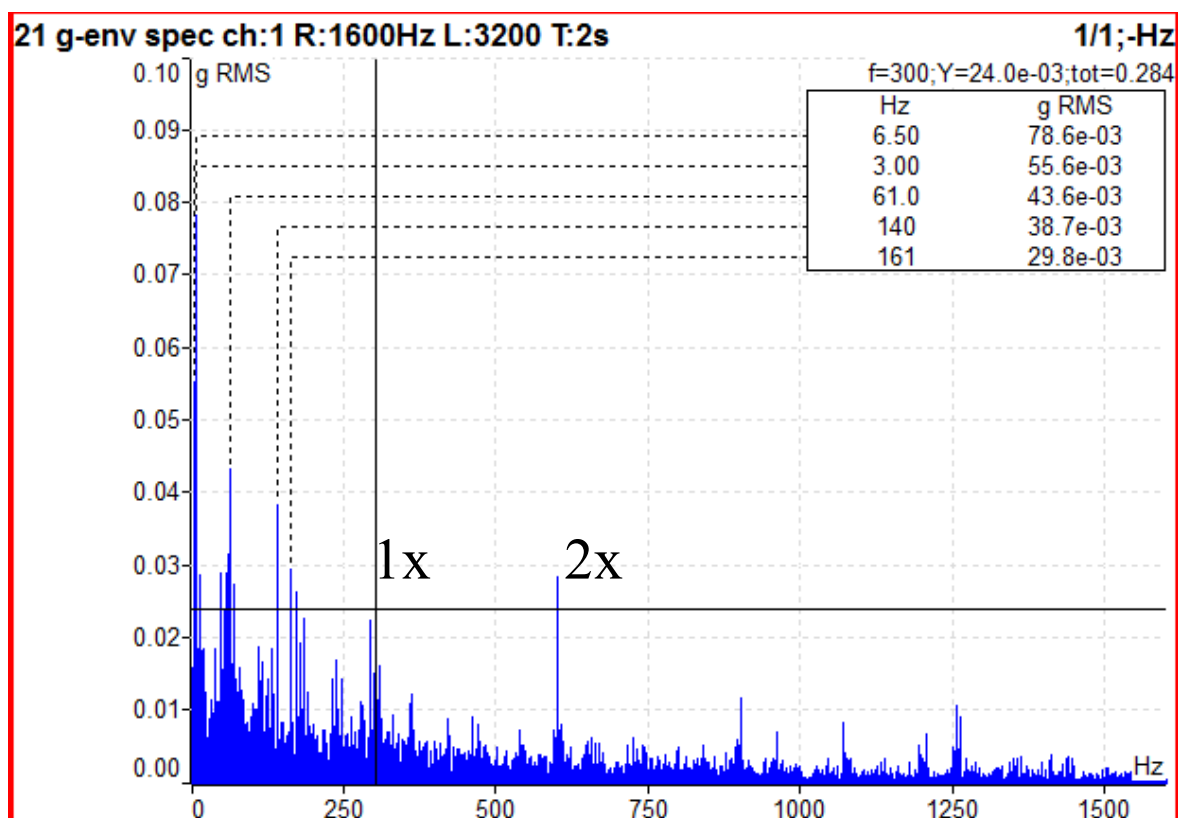
Obr. 30 Frekvenční analýza v horizontálním směru Hx s výraznou první otáčkovou frekvencí odpovídající 300 Hz a jejími násobky pro 18000 ot/min



Obr. 31 Frekvenční analýza v horizontálním směru H_y s výraznou první otáčkovou frekvencí odpovídající 300 Hz pro 18000 ot/min



Obr. 32 Časový záznam efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve směru horizontálním H_x pro 18000 ot/min



Obr. 33 Obálková metoda se zvýrazněním první otáčkové frekvence odpovídající 300 Hz a jejími násobky pro 18000 ot/min

7.4.2 Druhé měření

Při druhém měření bylo postupováno stejně jako u prvního měření, rozdílné byly nástroje upnuté ve vřetenu, při prvním měření byl ve vřetenu upnut nástroj s větším průměrem.

Tab. 9: Rychlost a zrychlení vibrací pro nízké otáčky

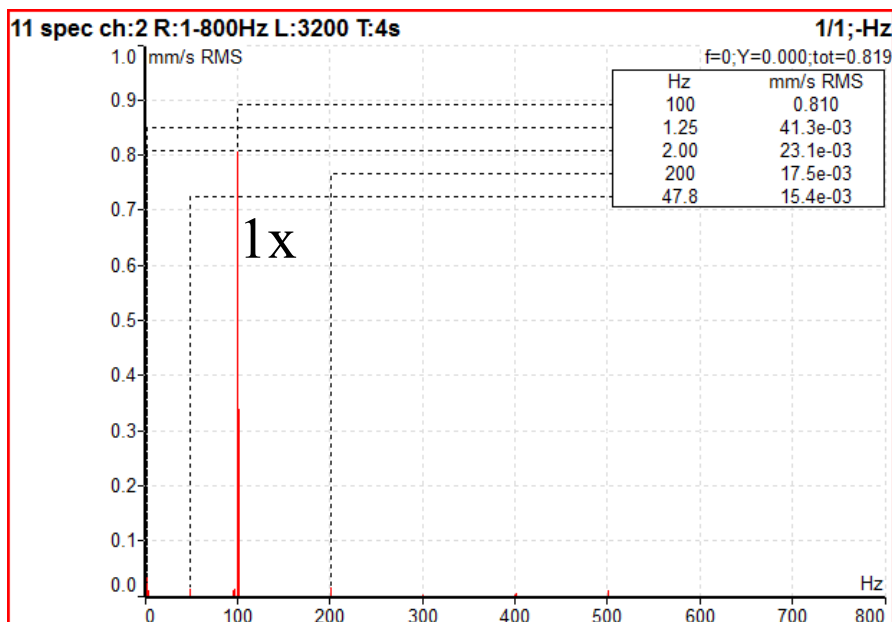
2. Měření - nízké otáčky (500-2500 ot/min)															
Otáčky [ot/min]	500			1000			1500			2000			2500		
Osy snímačů	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A
Rychlost [mm/s]	0,048	0,046	0,043	0,041	0,042	0,056	0,047	0,065	0,051	0,051	0,089	0,033	0,049	0,083	0,053
Zrychlení [g]	0,097	0,054	0,150	0,166	0,100	0,183	0,275	0,143	0,190	0,509	0,224	0,226	0,509	0,211	0,211

Dle normy byly posouzeny hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací. Měření bylo rozděleno do dvou a to na měření s nízkými otáčkami (500-2500 ot/min) se zvyšováním otáček po 500 ot/min a s vysokými otáčkami (3000-18000 ot/min) se zvyšováním otáček po 3000ot/min.

Tab. 10: Rychlost a zrychlení vibrací pro vysoké otáčky

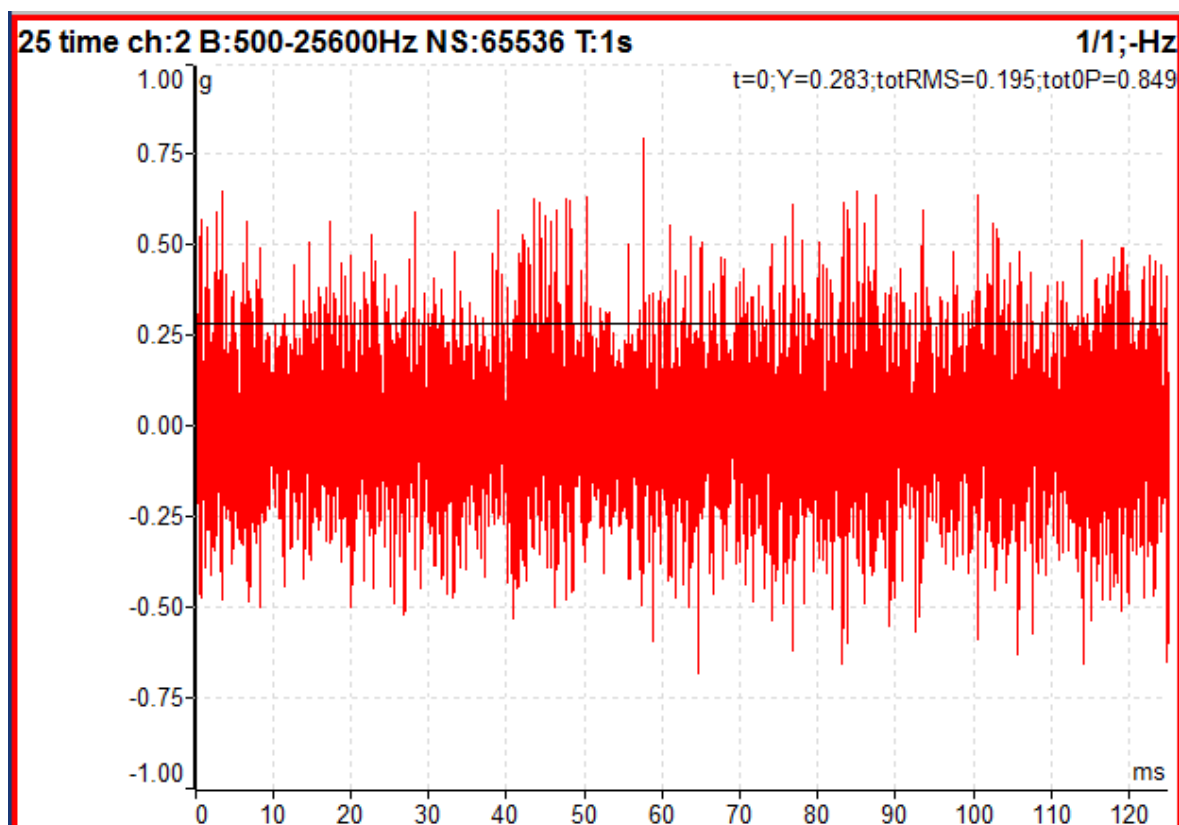
2. Měření - vysoké otáčky (3000-18000 ot/min)																		
Otáčky [ot/min]	3000			6000			9000			12000			15000			18000		
Osy snímačů	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A
Rychlost [mm/s]	0,03	0,041	0,014	0,085	0,821	0,166	0,146	0,198	0,054	0,285	0,46	0,079	0,32	0,659	0,115	1,48	0,907	0,164
Zrychlení [g]	0,362	0,172	0,207	0,37	0,205	0,177	0,719	0,325	0,341	0,456	0,276	0,575	0,466	0,393	0,567	0,789	0,536	0,663

Při měření větších rychlostí byly naměřeny zvýšené hodnoty vibrací stejně jako při prvním měření, hodnoty zrychlení se příliš nemění. Pozornost je třeba věnovat 6000, 15000 a 18000 ot/min. U těchto otáček byla naměřena zvýšená hodnota rychlosti vibrací, které se nacházejí v pásmu B/C, u 18000ot/min je hodnota rychlosti vibrací 1,48 mm/s což odpovídá pásmu C/D. Všechny hodnoty v axiálním směru jsou minimální, to může být způsobeno umístěním snímače. Zvýšené hodnoty jsou u stejných otáček i ve stejných směrech.

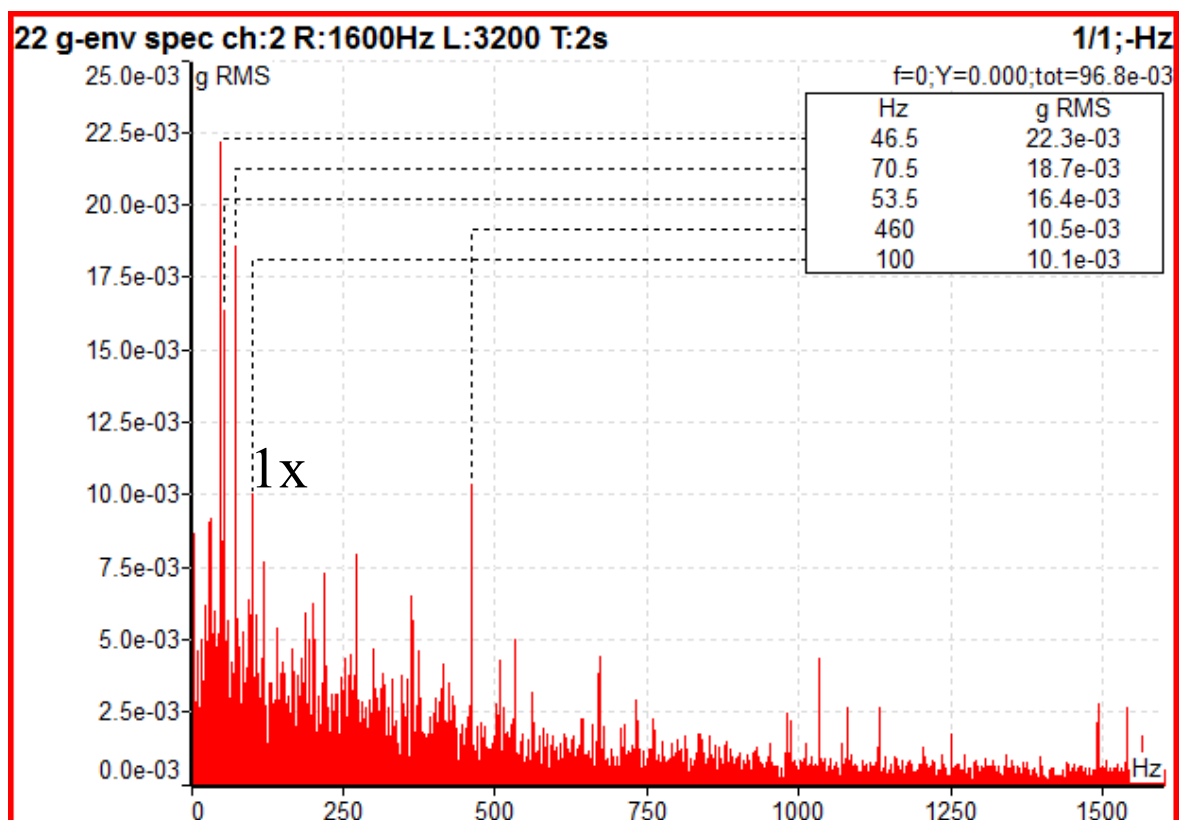


Obr. 34 Frekvenční analýza s výraznou první otáčkovou frekvencí odpovídající 100 Hz v horizontálním směru Hy pro 6000 ot/min (druhé měření)

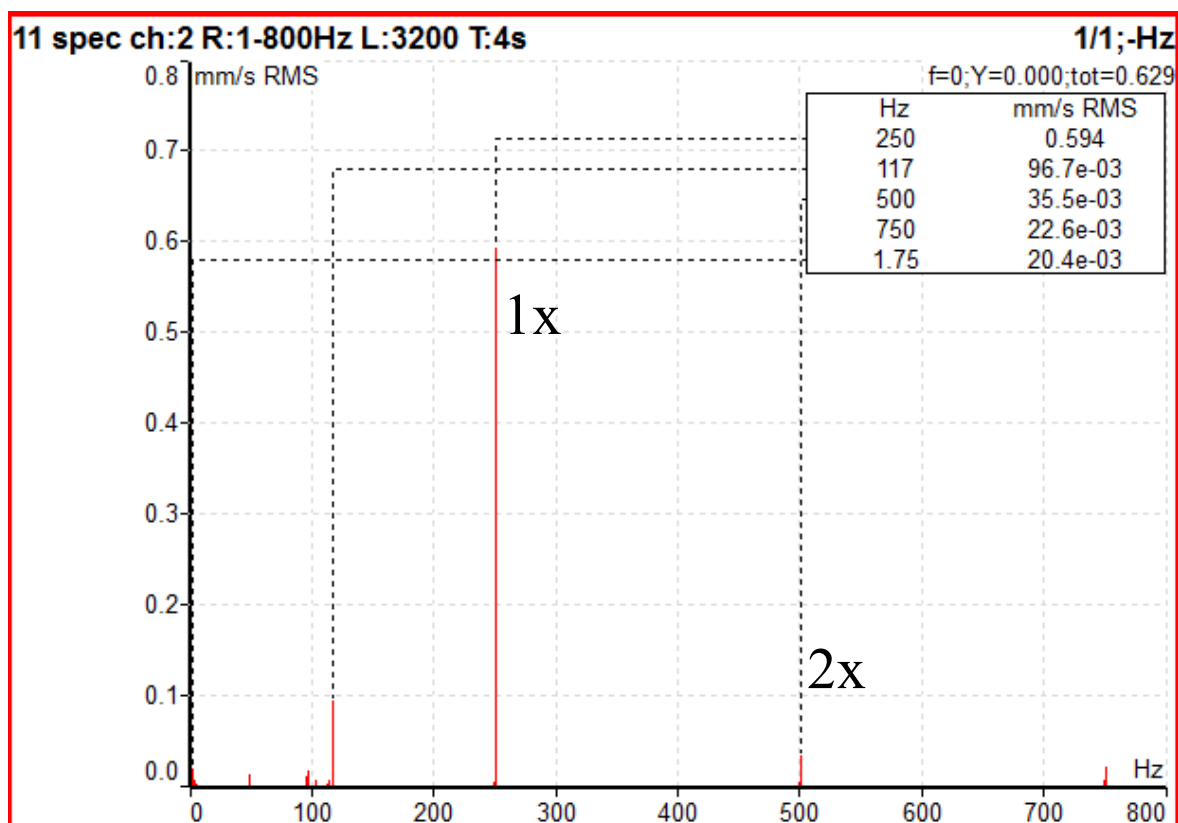
První otáčková frekvence pro 6000 ot/min odpovídá 100 Hz, takto vysoká rychlost vibrací značí nevývahu naměřenou v horizontálním směru Hy s možným projevem rezonance.



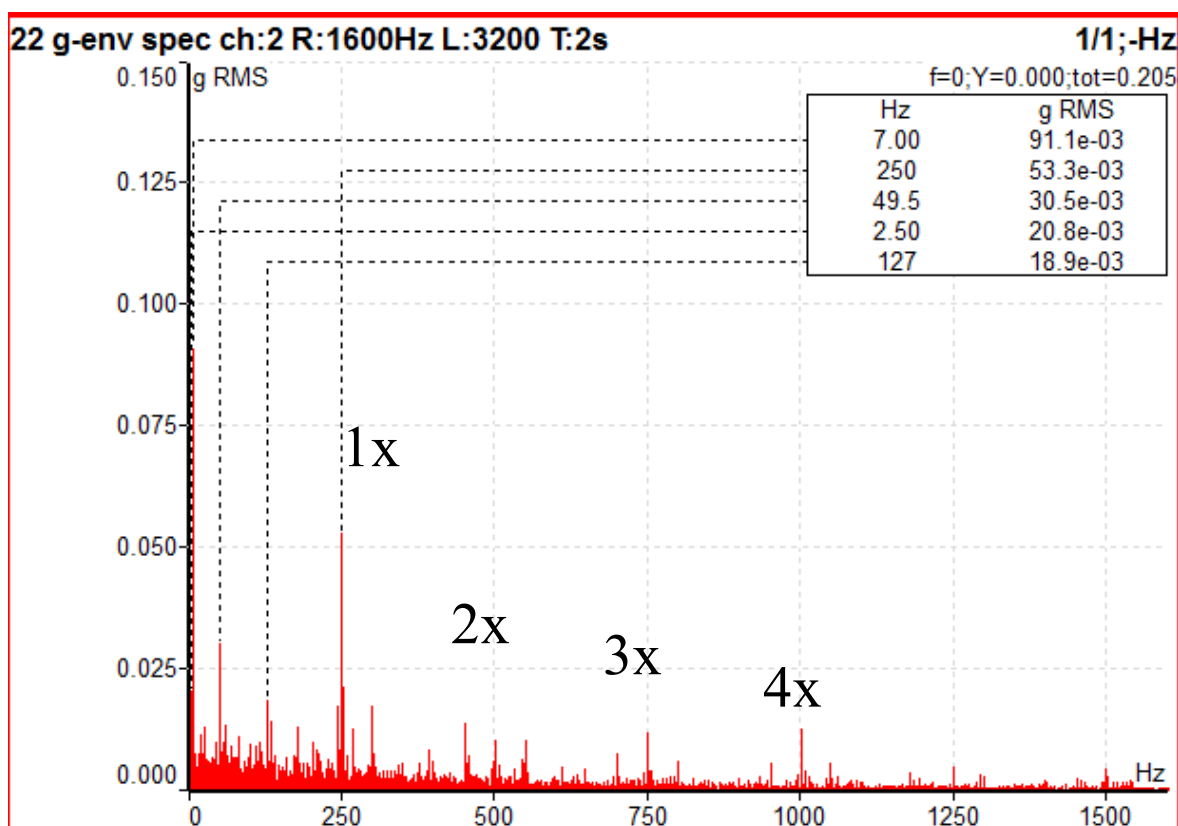
Obr. 35 Časový záznam efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve směru horizontálním Hy pro 6000 ot/min (druhé měření)



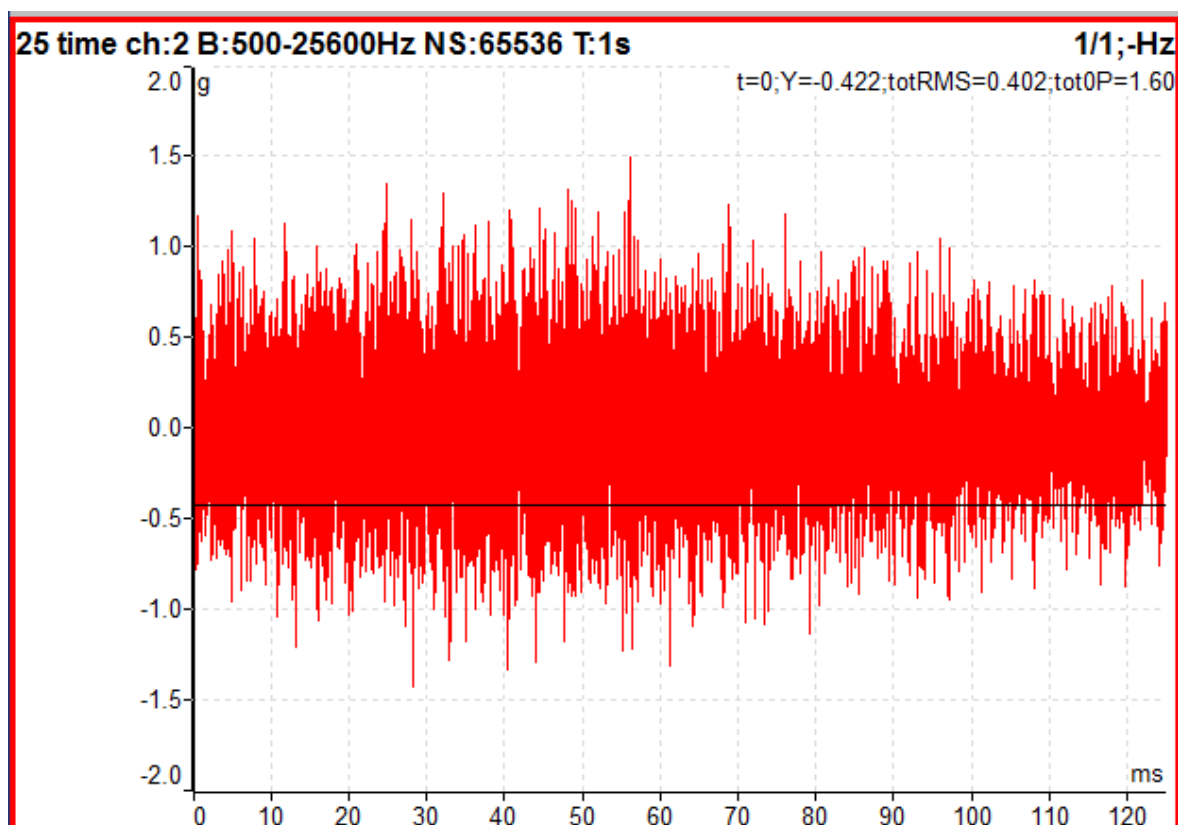
Obr. 36 Obálková metoda se zvýrazněním první otáčkové frekvence odpovídající 100 Hz v horizontálním směru Hy pro 6000 ot/min (druhé měření)



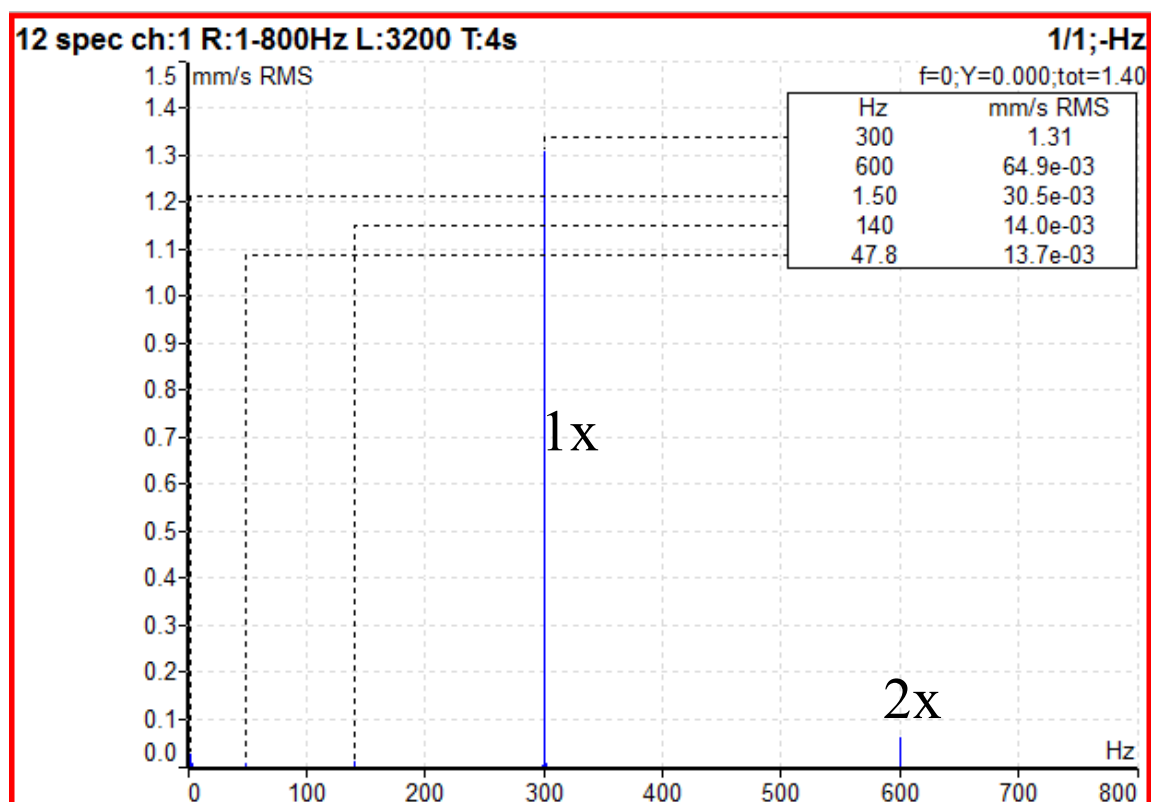
Obr. 37 Frekvenční analýza s výraznou první otáčkovou frekvencí odpovídající 250 Hz a jejími násobky ve směru Hy pro 15000 ot/min (druhé měření)



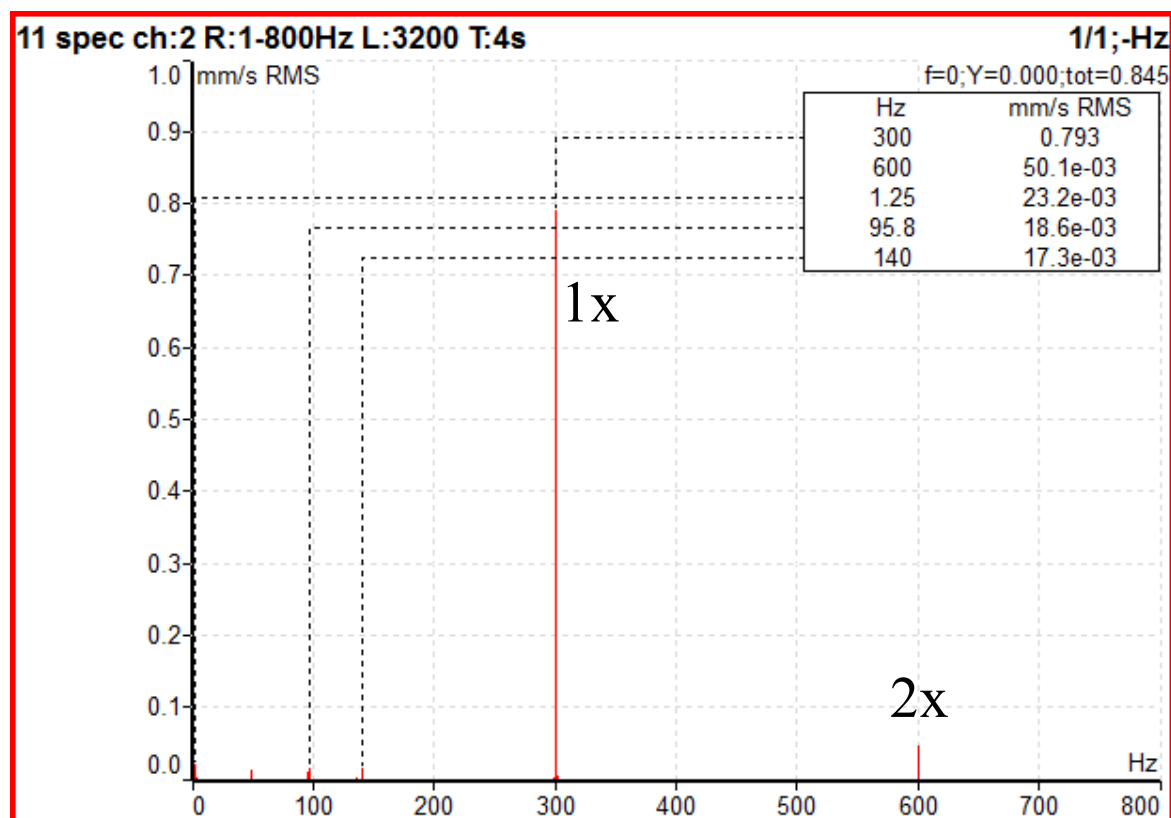
Obr. 38 Obálková metoda se zvýrazněnou první otáčkovou frekvencí odpovídající 250 Hz a její násobky v horizontálním směru Hy pro 15000 ot/min (druhé měření)



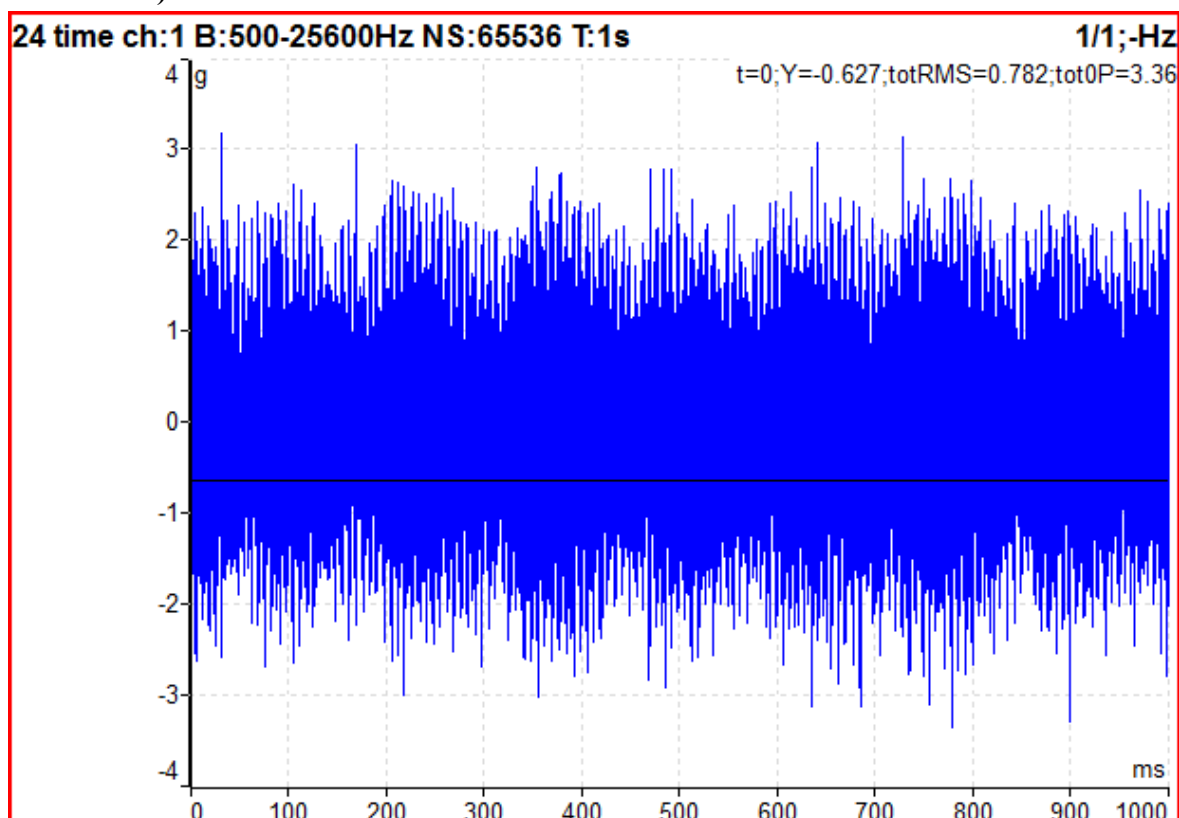
Obr. 39 Časový záznam efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve směru horizontálním Hy pro 15000 ot/min (druhé měření)



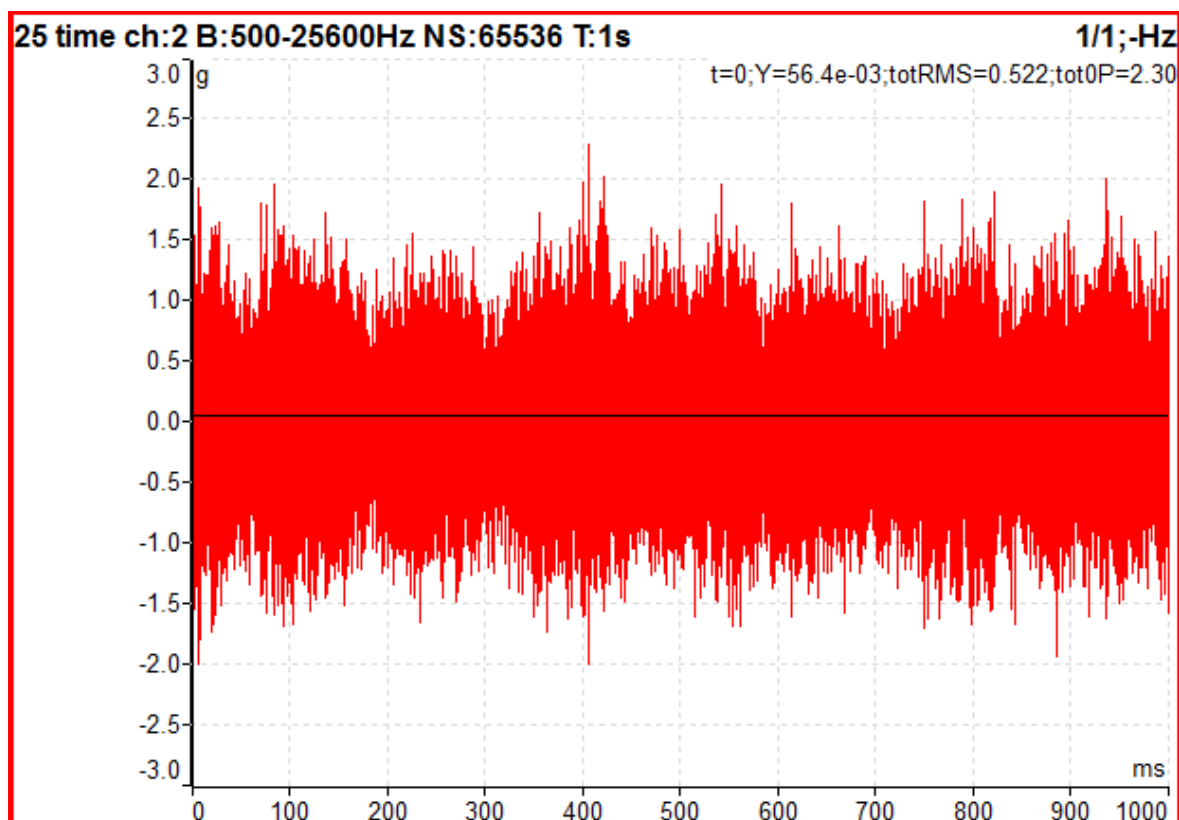
Obr. 40 Frekvenční analýza s výraznou první otáčkovou frekvencí odpovídající 300 Hz a jejím násobkem v horizontálním směru Hx pro 18000 ot/min (druhé měření)



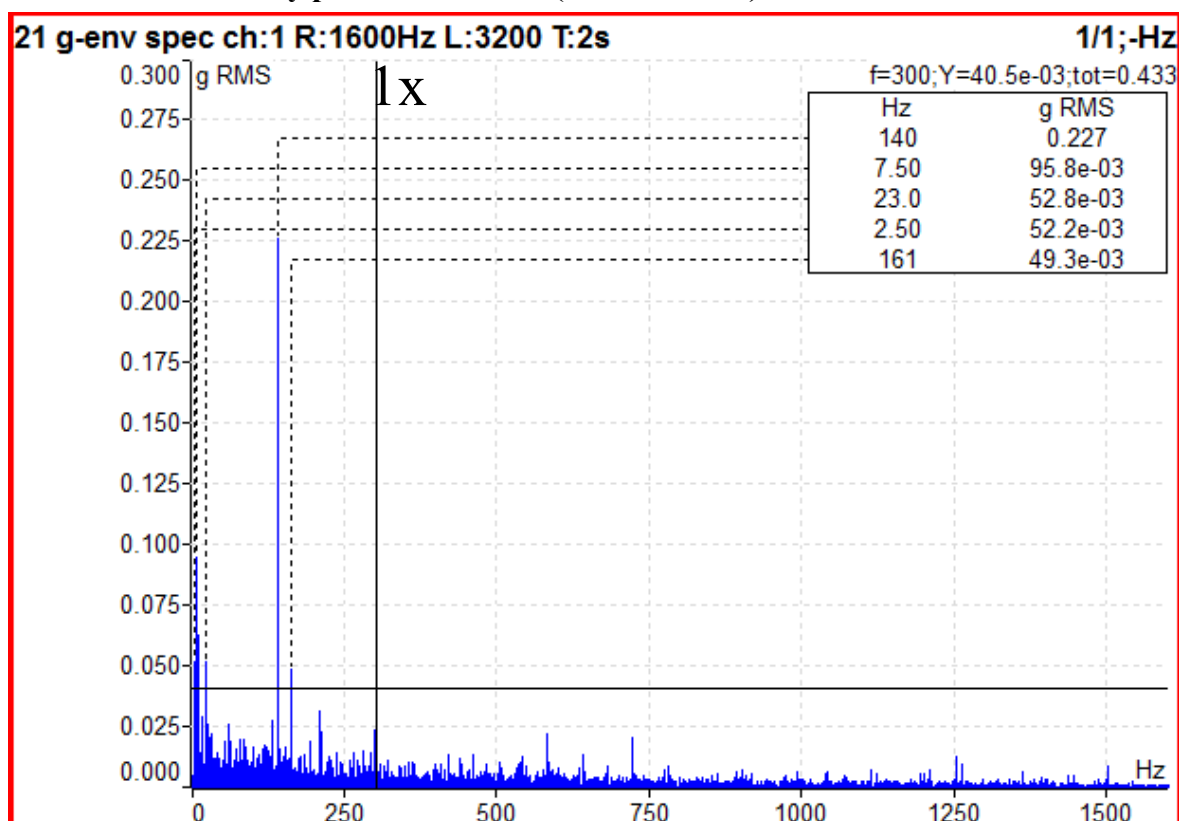
Obr. 41 Frekvenční analýza s výraznou první otáčkovou frekvencí odpovídající 300 Hz a jejím násobkem v horizontálním směru H_y pro 18000 ot/min (druhé měření)



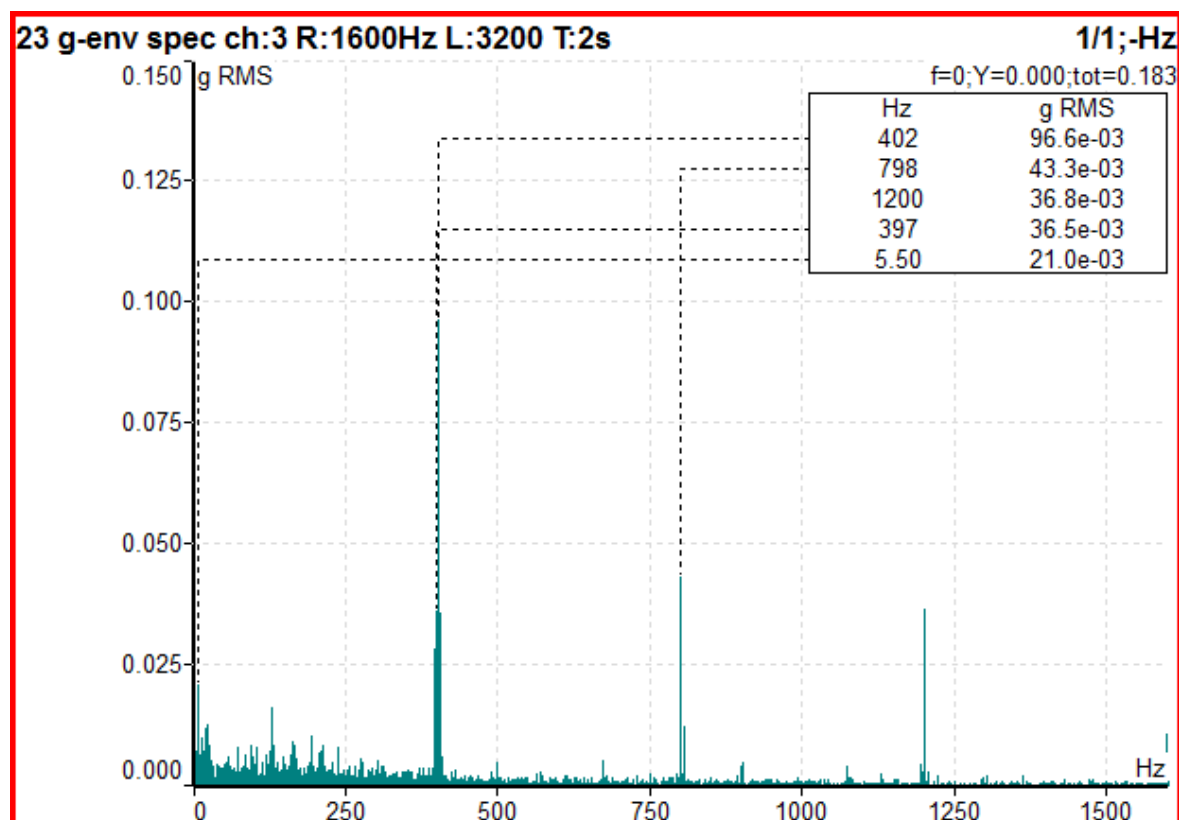
Obr. 42 Časový záznam efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve směru horizontálním H_x pro 18000 ot/min (druhé měření)



Obr. 43 Časový záznam efektivní hodnoty zrychlení vibrací ve směru horizontálním Hy pro 18000 ot/min (druhé měření)



Obr. 44 Obálková metoda v horizontálním směru Hx s vyznačením první otáčkové frekvence odpovídající 300 Hz pro 18000 ot/min (druhé měření)



Obr. 45 Obálková metoda pro měření v axiálním směru A pro 18000 ot/min (druhé měření)

7.4.3 Měření rezonance a Bump test

Při prvním i druhém měření se při 6000 ot/min objevila zvýšená rychlost vibrací ve stejném směru (Hy), ve spektrech se tato zvýšená rychlost projevila na 100 Hz. Tato frekvence vedla k tomu, že bylo provedeno i třetí měření a to měření pro potvrzení rezonance stroje. Nejprve bylo provedeno měření se třemi snímači od 3000 ot/min do 7500 ot/min s postupným zvyšováním po 500 ot/min. Po změření jsem ihned sledoval na analyzátoru vývoj rychlostí vibrací a zjistil, že rychlost vibrací začala stoupat zhruba u 5000 ot/min s maximem při 6000 ot/min. Proto jsem ihned provedl další měření od 5500 ot/min do 6500 ot/min, s postupným zvyšováním po 200 ot/min pro přesnější odhalení frekvence zvyšování rychlosti vibrací. Určení největší rychlosti vibrací v tomto otáčkovém rozmezí určí frekvenci rezonance stroje. Hodnoty z měření jsou uvedeny v tabulce 11 a 12.

Tab. 11: Rychlost a zrychlení vibrací pro 4500 – 7500 ot/min

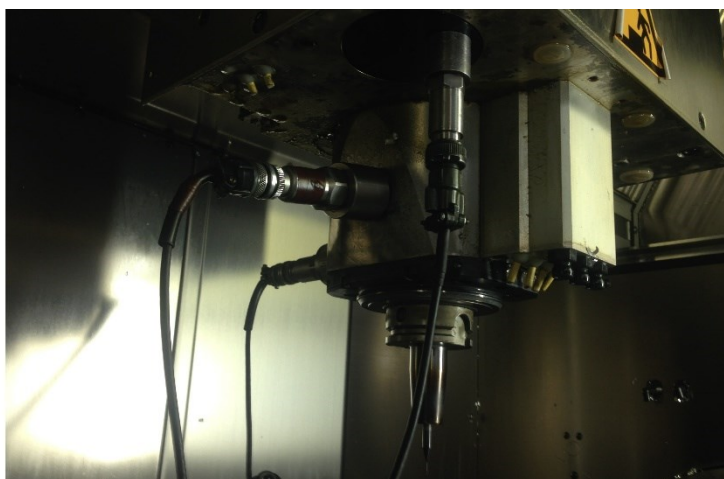
Měření rezonance (4500 -7500 ot/min)																						
Otáčky [ot/min]	4500			5000			5500			6000			6500			7000			7500			
Osy snímačů	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	
Rychlost [mm/s]	0,075	0,067	0,078	0,064	0,150	0,088	0,046	0,320	0,123	0,133	1,23	0,291	0,095	0,388	0,135	0,223	0,675	0,174	0,354	0,311	0,174	
Zrychlení [g]	0,167	0,227	0,183	0,202	0,245	0,179	0,185	0,251	0,182	0,168	0,263	0,211	0,278	0,495	0,505	0,299	0,438	0,472	0,340	0,518	0,506	

Hodnoty rychlosti vibrací se postupně zvyšovaly, až dosáhly maxima při 6000 ot/min. První měření tedy potvrdilo, že frekvence rezonance je pravděpodobně okolo 6000 ot/min.

Tab. 12: Rychlost a zrychlení vibrací pro 5500 – 6500 ot/min

Měření rezonance (5500 - 6500 ot/min)																		
Otáčky [ot/min]	5500			5700			5900			6100			6300			6500		
Osy snímačů	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A	Hx	Hy	A
Rychlost [mm/s]	0,043	0,292	0,088	0,042	0,579	0,116	0,138	1,39	0,219	0,126	0,910	0,141	0,105	0,511	0,099	0,118	0,403	0,109
Zrychlení [g]	0,167	0,227	0,183	0,202	0,245	0,179	0,185	0,251	0,182	0,168	0,263	0,211	0,278	0,495	0,505	0,299	0,438	0,472

Z naměřených hodnot je patrné, že rezonance se nachází mezi 5900-6100 ot/min. Největší hodnota rychlosti vibrací byla naměřena při 5900 ot/min, tato frekvence odpovídá frekvenci rezonance stroje.

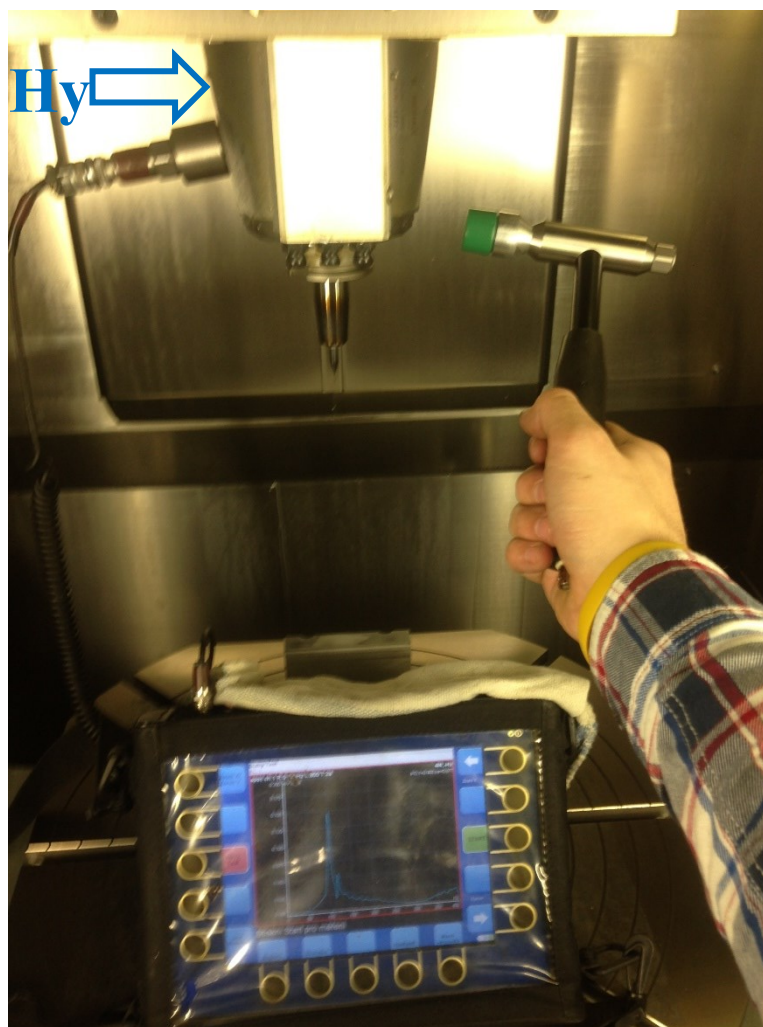


Obr. 46 Umístění snímačů při měření rezonance je stejné jako u jiných měření [Autor]

Provedení bump testu potvrdilo rezonanci stroje. Bump test byl proveden se všemi nástavci o různé tvrdosti úderné plochy.

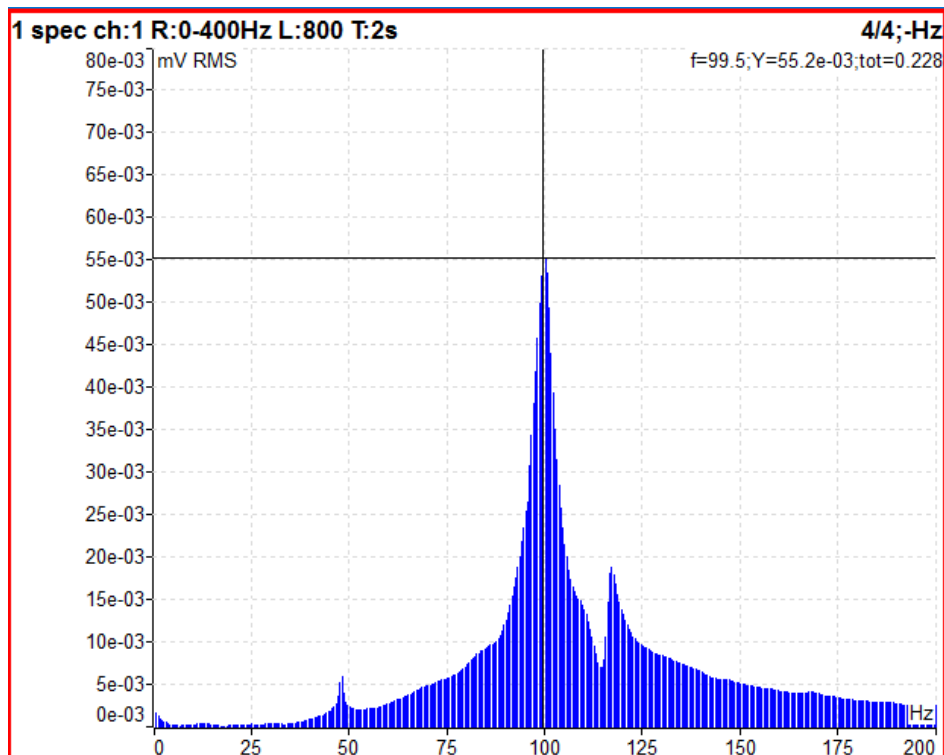


Obr. 47 Kladívko Kistler pro rázovou zkoušku s nástavci [Autor]

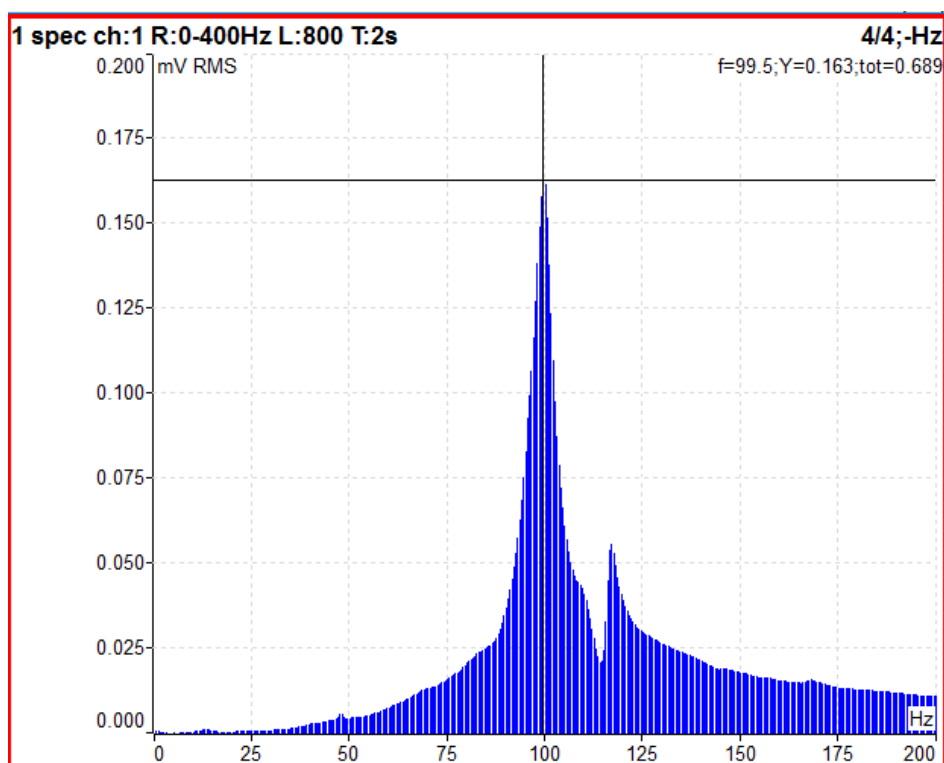


Obr. 48 Provedení Bump testu kladívkem Kistler s nejtvrdším nástavcem [Autor]

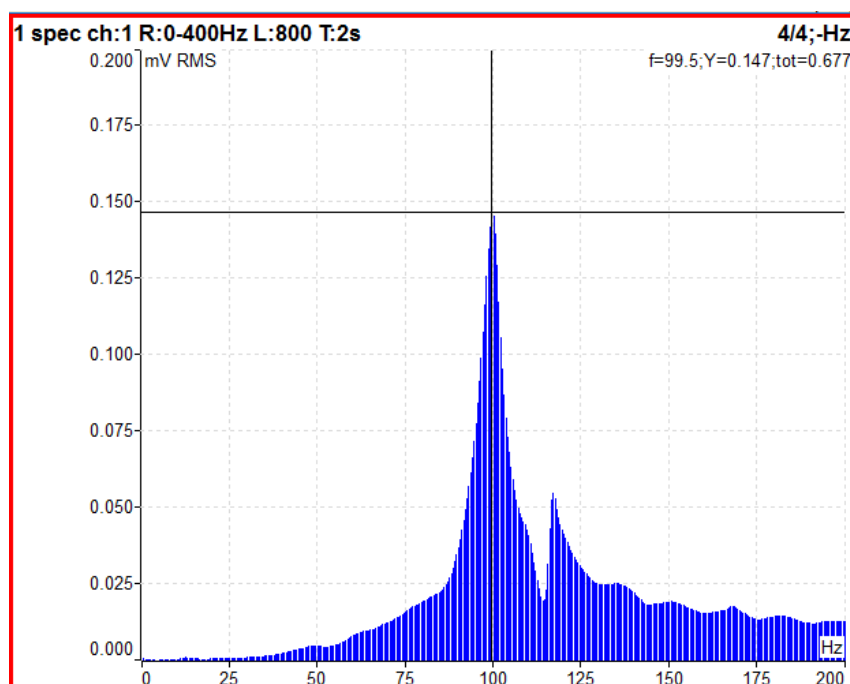
Při měření Bump testu byl použit stejný snímač vibrací jako u všech měření. Měření bylo zaměřeno na směr Hy, tedy směr ve kterém byla rychlost vibrací největší. Analýza naměřených hodnot bump testů od nejměkčího nastavce po nejtvrdší.



Obr. 49 Provedení Bump testu kladívkem Kistler s nejměkčím nastavcem, frekvence rezonance odpovídá 99,5 Hz

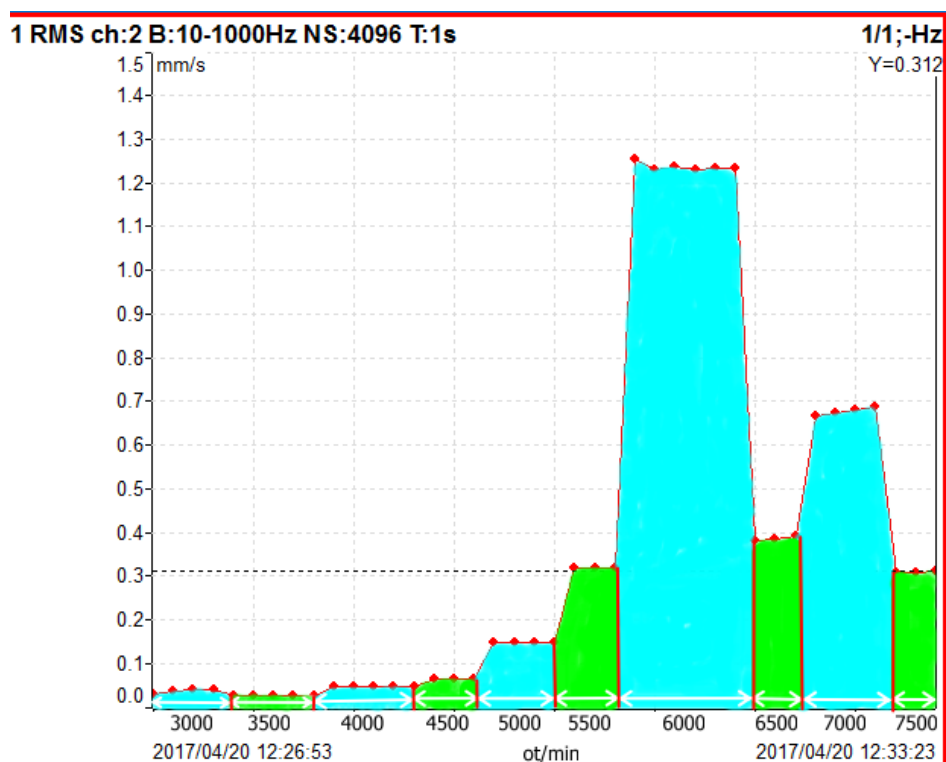


Obr. 50 Provedení Bump testu kladívkem Kistler se středním nastavcem, frekvence rezonance odpovídá 99,5 Hz

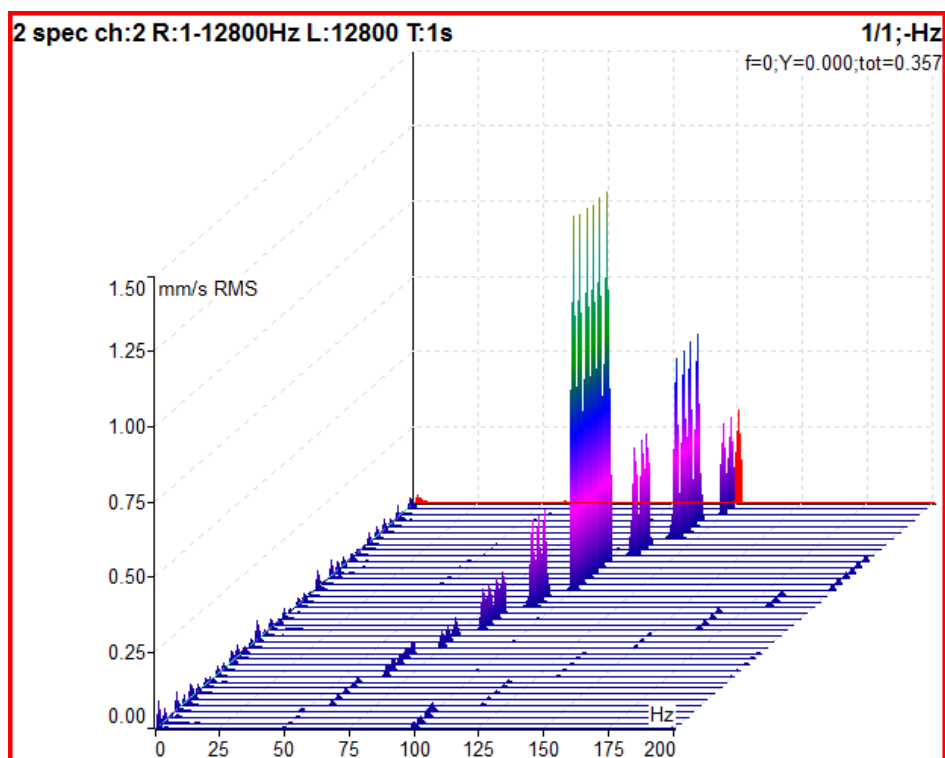


Obr. 51 Provedení Bump testu kladívkem Kistler s nejtvrdším nastavcem, frekvence rezonance odpovídá 99,5 Hz

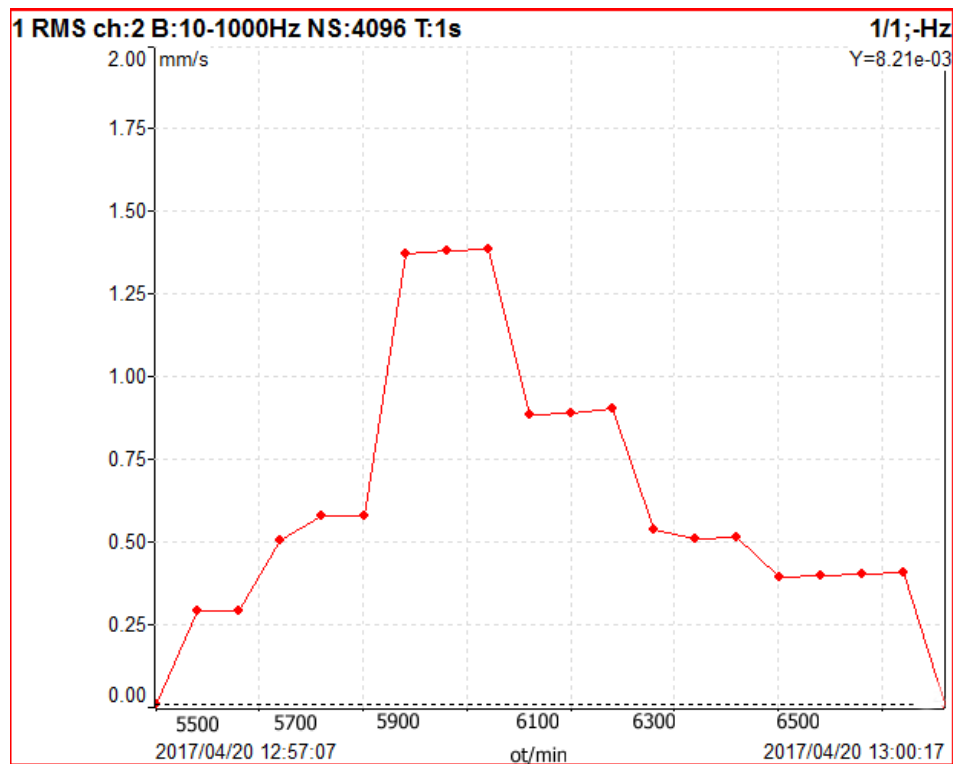
U všech měření frekvence rezonance odpovídá 99,5 Hz, v přepočtu tedy 5970 ot/min. Tyto měření potvrdily rezonanci stroje, což může být způsobeno konstrukční závadou stroje. Doporučuji, pokud je to možné vyhnout se těmto otáčkám při provozu stroje, případně tyto otáčky co nejrychleji překročit.



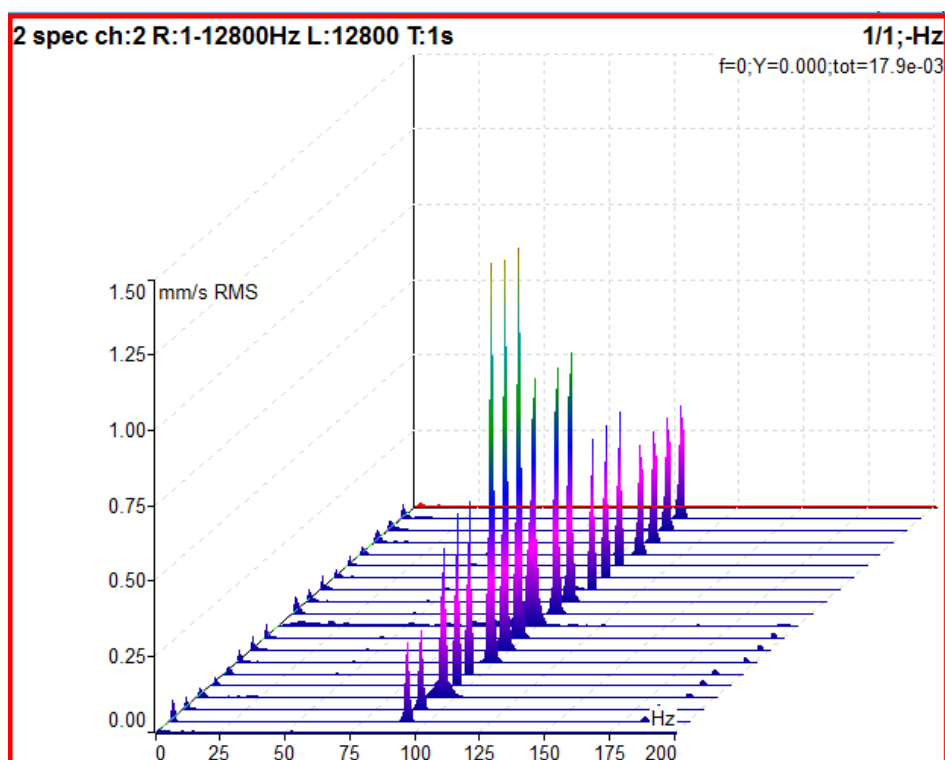
Obr. 52 První měření rezonance po 500 otáčkách, otáčky byly zvětšovány nelineárně, průběh s největším maximem při 6000 ot/min což odpovídá 100 Hz



Obr. 53 První měření rezonance po 500 otáčkách, na spektru lze vidět, že největší frekvence rezonance se projevuje při 100 Hz, potvrzeno i bump testem (frekvence 99,5 Hz)



Obr. 54 Druhé měření rezonance po 200 otáčkách, postupný průběh s největším maximem při 5900 ot/min což odpovídá 98,3 Hz

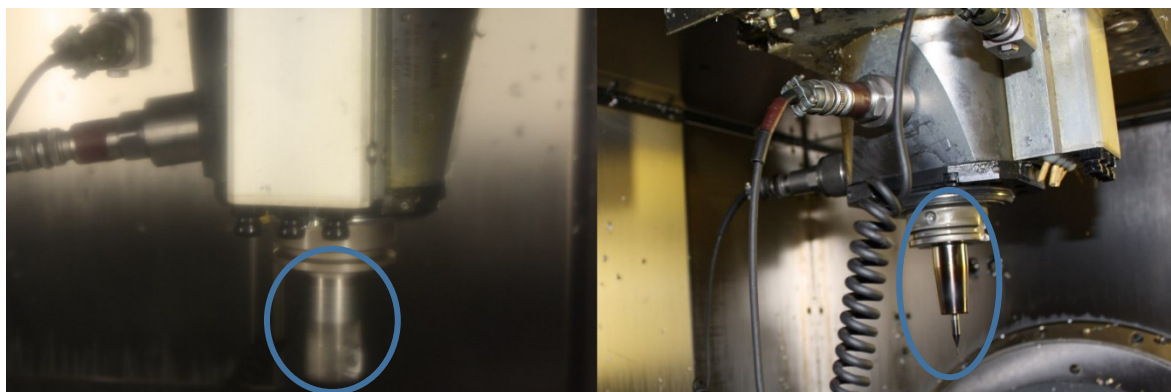


Obr. 55 Druhé měření rezonance po 200 otáčkách, na spektru lze vidět, že frekvence rezonance se projevuje pod 100 Hz, potvrzeno i bump testem (frekvence 99,5 Hz)

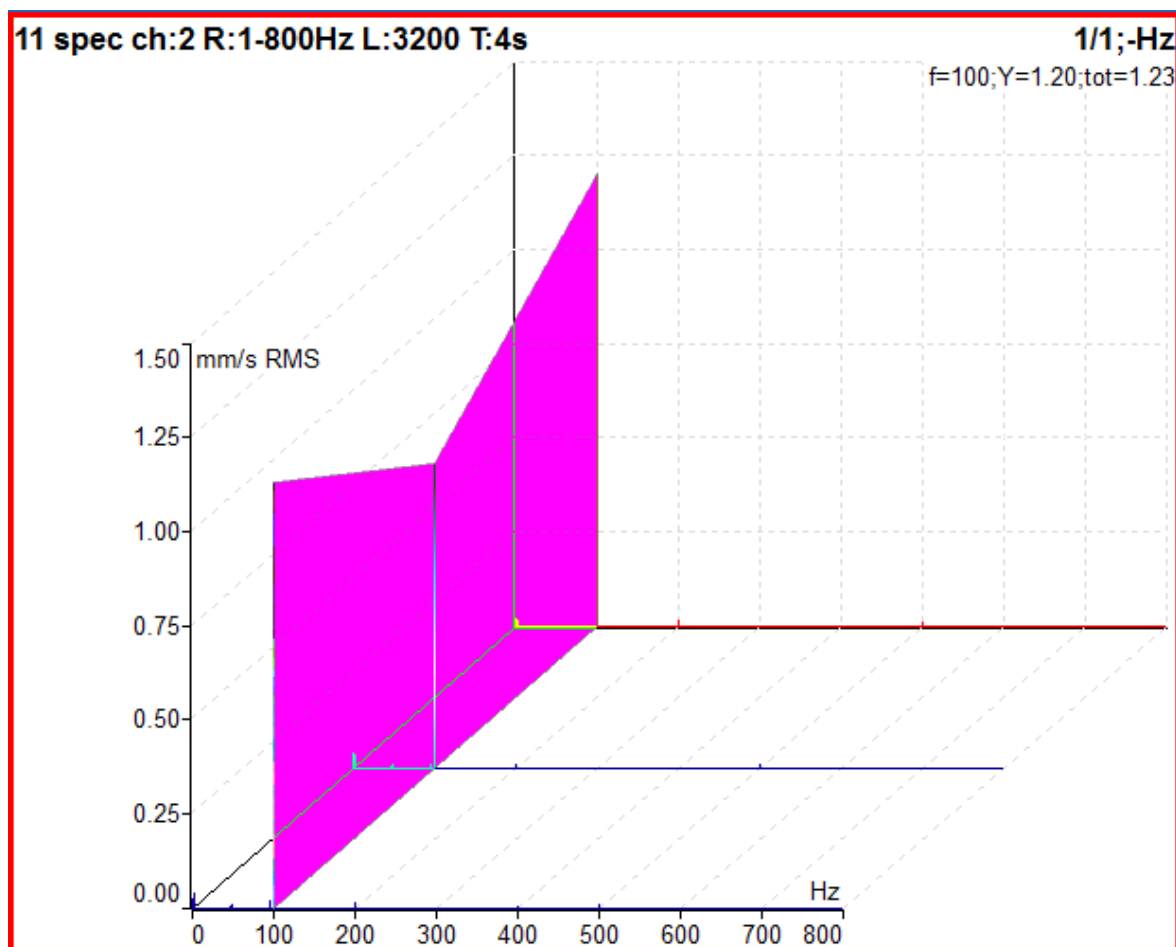
Pomocí funkce rozběh v software Virtual Unit je rezonance mnohem lépe zobrazena, nejlépe je rezonance vidět při postupném zvyšování otáček. První měření bylo provedeno ve větším otáčkovém rozsahu 3000 – 7500 ot/min. Druhé měření je zaměřeno co nejblíže frekvenci rezonance na 5500 – 6500 ot/min po 200 ot/min. Všechna měření potvrdila rezonanci při 6000 ot/min.

7.4.4 Srovnání a zhodnocení vibrodiagnostického měření

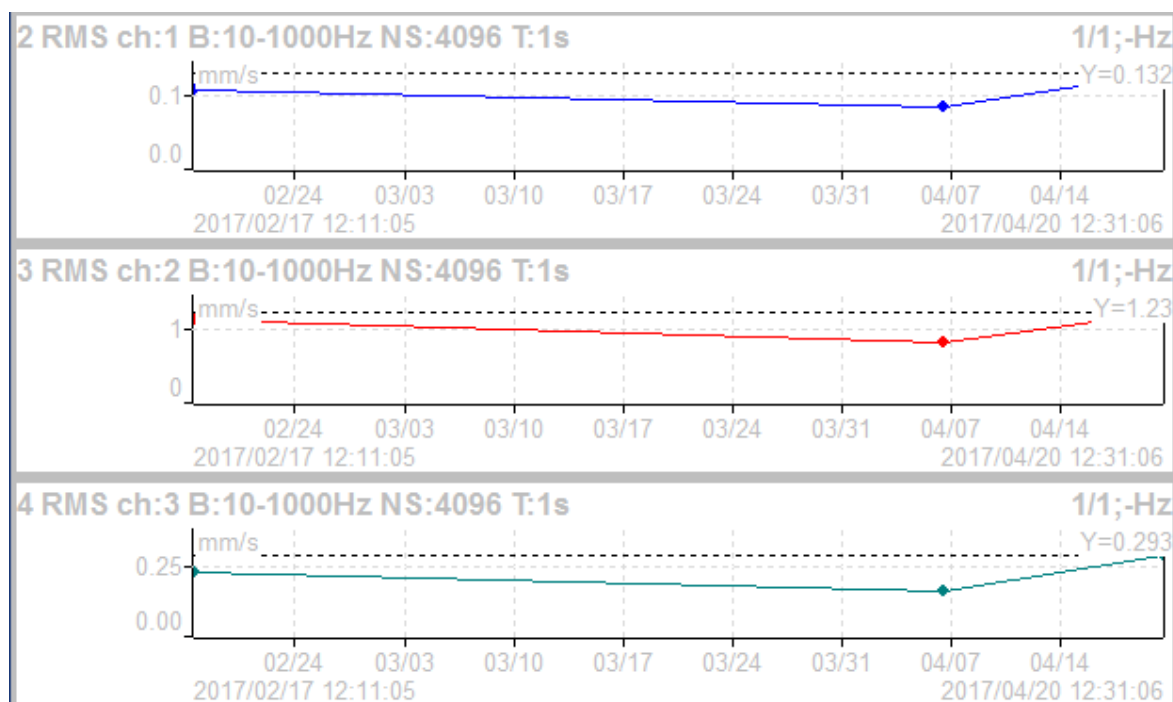
Při měření byly použity rozdílné nástroje, což mohlo mít za následek rozdílné hodnoty v měření, větší průměr nástroje má větší hmotu a působí větší odstředivou silou. Pozornost jsem věnoval zvýšeným hodnotám měření, které se projevily u stejných otáček a směrů, tedy 6000, 15000 a 18000 ot/min. Rozdíly v hodnotách nejsou velké, přisuzuji je tomu, že byl při druhém měření upnutý nástroj o menším průměru.



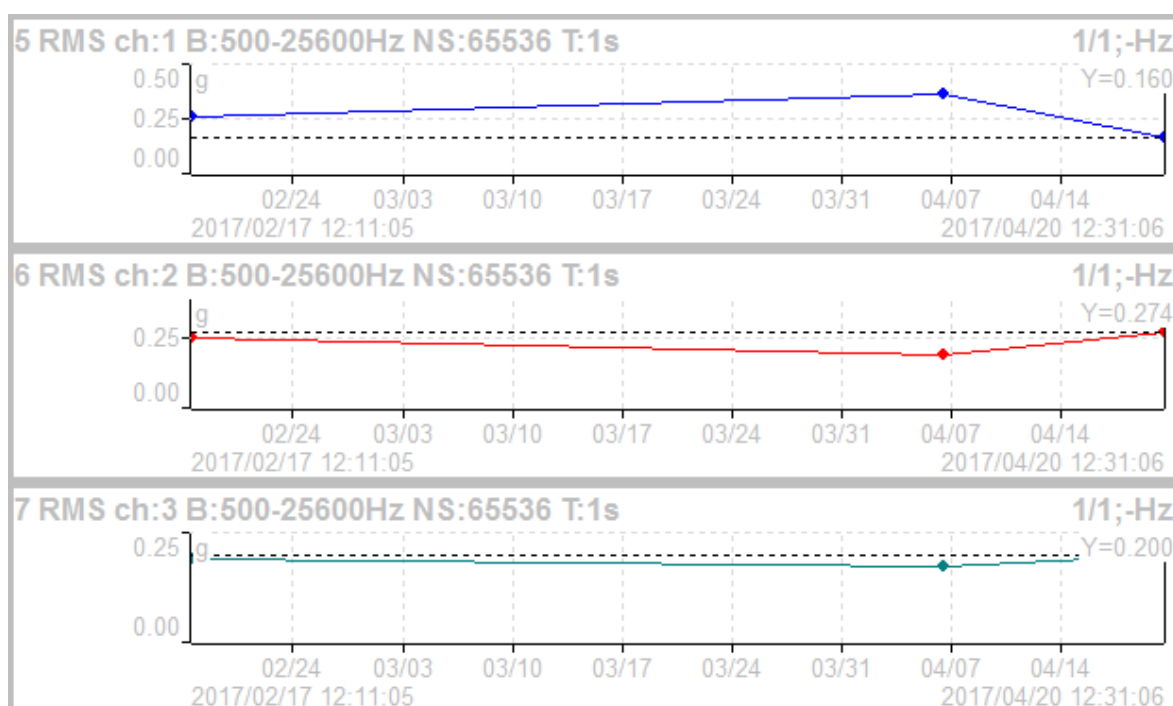
Obr. 56 Upnutý nástroj při prvním měření (vlevo), druhé měření (vpravo) [Autor]



Obr. 57 Frekvenční analýza v horizontálním směru H_y pro všechny tři provedené měření s projevem nevývahy, od nejstaršího po nejnovější měření (nejnovější vzadu)

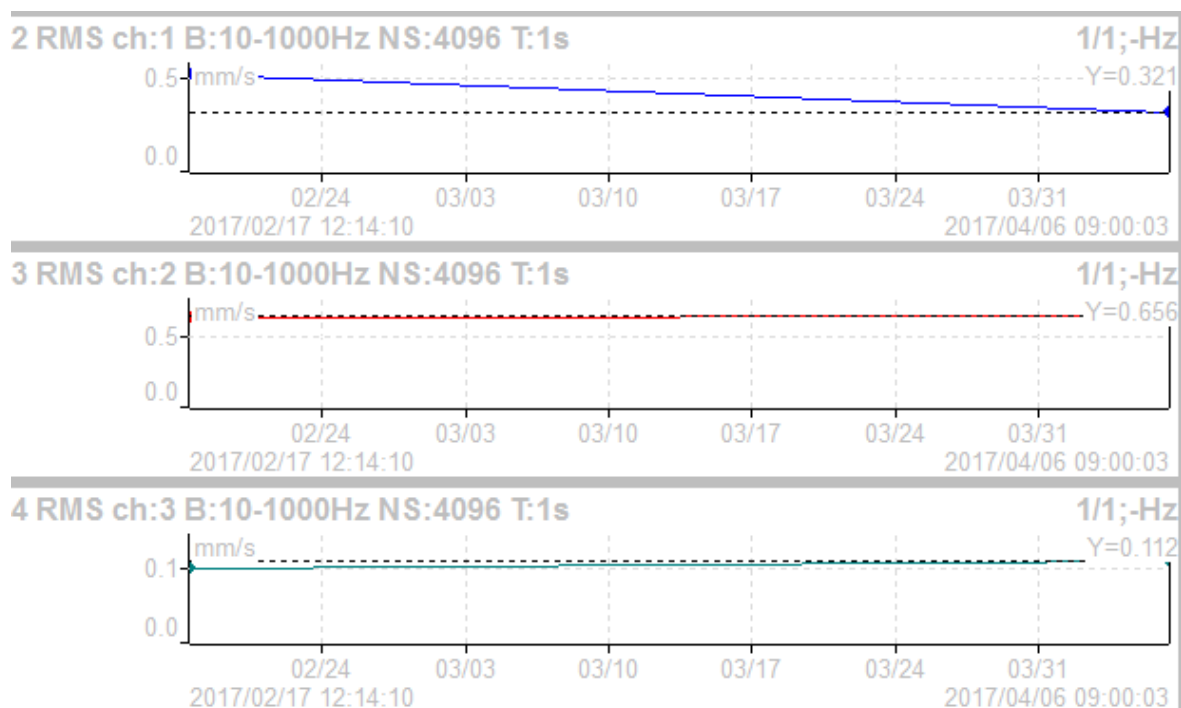


Obr. 58 Trend celkových rychlostí vibrací pro 6000 ot/min (100 Hz)

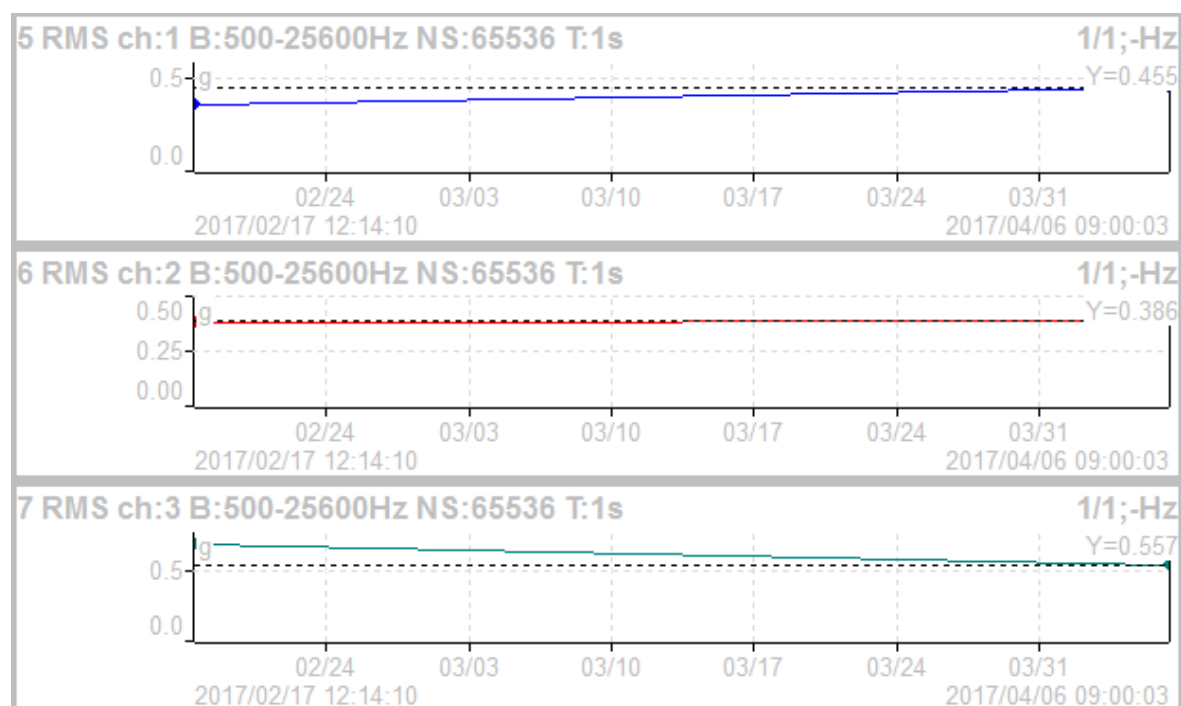


Obr. 59 Trend celkových zrychlení vibrací pro 6000 ot/min (100 Hz)

Pro 6000 ot/min byly provedeny celkem tři měření, kvůli podezření na přítomnost rezonance, na trendu je patrné, že změny ve velikosti nejsou velké, ale hodnoty ve směru H_y jsou zvýšené a dosahují hodnoty až 1,23 mm/s, což odpovídá pásmu B/C. Rezonance stroje se potvrdila i na provedených bump testech. Naměřená zrychlení jsou v nízkých hodnotách a není třeba jim věnovat zvýšenou pozornost.

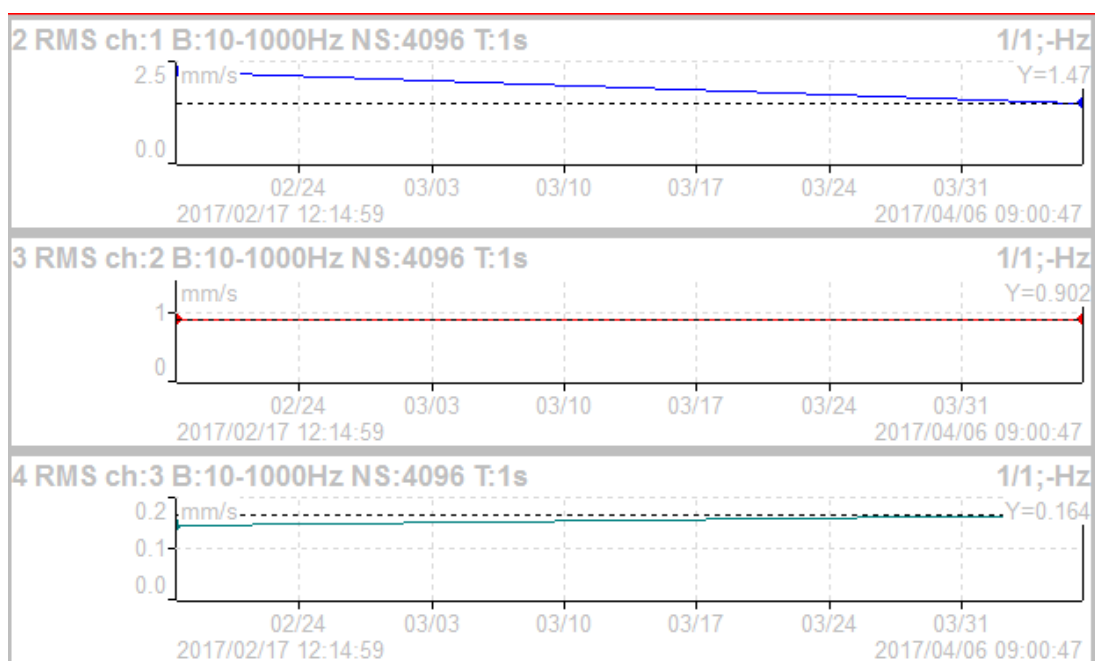


Obr. 60 Trend celkových rychlostí vibrací pro 15000 ot/min (250 Hz)

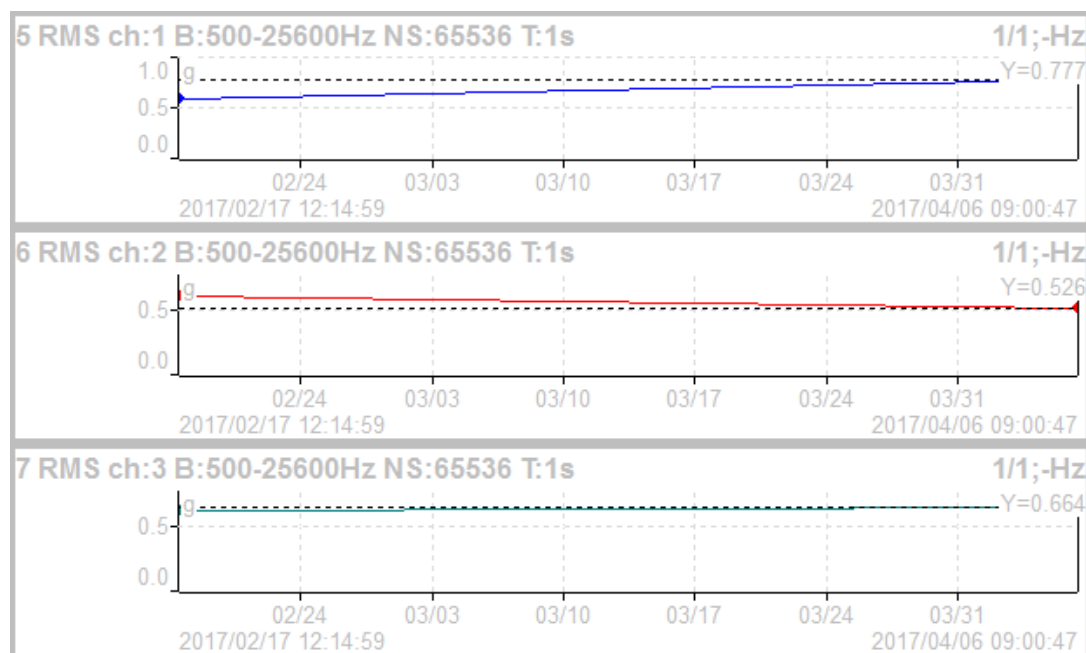


Obr. 61 Trend celkových zrychlení vibrací pro 15000 ot/min (250 Hz)

Při 15000 ot/min byly naměřeny zvýšené hodnoty ve směru Hy odpovídající pásnu B/C, při druhém měření s menším průměrem nástroje jsou hodnoty téměř stejné nebo s malým rozdílem. Ve směru Hx jsou hodnoty zvýšené ale u druhého měření je patrný pokles velikosti vibrací, tuto změnu lze přisoudit změně nástroje. První měření proběhlo s nástrojem o větším průměru, tedy větší hmotě, druhé měření bylo provedeno s nástrojem o průměru menším což se projevilo i na spektrech a naměřených hodnotách.



Obr. 62 Trend celkových rychlostí vibrací pro 18000 ot/min (300 Hz)



Obr. 63 Trend celkových zrychlení vibrací pro 18000 ot/min (300 Hz)

Měření pro 18000 ot/min bylo ovlivněno změnou nástroje, zvýšené hodnoty ve směrech H_x i H_y přisuzují tomu, že se jedná o vysoké otáčky stroje. Dle normy ČSN 200065 pro obráběcí stroje se jedná o již nepřipustný stav stroje s hodnotou rychlosti vibrací 2,24 mm/s v horizontálním směru H_x , je nutno vzít ale v potaz, že tato norma je z roku 1992, v té době pro obráběcí stroje nebylo 18000 ot/min běžné. S menším průměrem nástroje byla rychlost vibrací 1,5 mm/s v horizontálním směru H_x . Hodnota 2,24 mm/s je zvýšená a s náznakem rezonance, ale dle zkušenosti lze říct, že tato hodnota není znepokojivá jelikož 18000 ot/min se na stroji nevyužívá.

8. Tribodiagnostické měření

Odběr a analýza vzorků oleje byly zkomplikovány ztrátovým mazáním stroje, potřebné oleje nebylo možné odebrat. Stroj má centrální mazací systém, který sám dávkuje mazivo do celého stroje. Referenční vzorek řezného oleje a jeho analýza odhalí kvalitu, vhodnost a čistotu tohoto oleje, který se mísí s vodou a tvoří řeznou kapalinu. Na základě odebraných vzorků byly provedeny zkoušky pro referenční vzorek řezného oleje, pro odhalení nečistot a jiných možných nežádoucích prvků v oleji. Při měření byly porovnávány koncentrace oleje a vody v řezné kapalině. Pomocí refraktometru byly experimentálně určeny hodnoty odpovídající koncentracím % oleje ve vodě, na základě toho jsem provedl i další zkoušky FT-IR a rentgenovou spektrometrii. Před každou zkouškou byl vzorek řádně protřepán, aby došlo k jeho úplné homogenizaci.

8.1 Odběr vzorků

Odebrány byly vzorky řezné kapaliny při prvním i druhém měření, při druhém měření byl odebrán referenční vzorek řezného oleje. Při měření v laboratořích byly vytvořeny směsi odpovídající spodní a horní hranici koncentrace oleje v řezné kapalině, které jsou používány při obrábění a to 5% a 8% oleje ve vodě (destilované). Při metodě FT-IR by se odebrané vzorky řezné kapaliny měly pohybovat mezi těmito dvěma spektry.



Obr. 64 Všechny odebrané vzorky v laboratořích při měření [Autor]

8.2 Rentgenová spektrometrie

Pomocí rentgenové spektrometrie byly proměřeny všechny odebrané vzorky.



Obr. 65 Měření pomocí rentgenového spektrometru a vzorky oleje [Autor]

Tab. 13: Výsledky rentgenové spektrometrie pro referenční vzorek řezného oleje Swiss Cool 7755 Aero, zobrazeny prvky s koncentrací nad 2 ppm

Spectro X - Referenční vzorek řezný olej čistý				
Značka	Prvek	Norm. Int.	Koncentrace	Abs. Chyba
I	Jód	386,7927	822,2ppm	3,9ppm
Na	Sodík	6,4483	< 1005ppm	(584)ppm
Fe	Železo	1201,4707	566,9ppm	1,6ppm
S	Síra	257,068	211,9ppm	0,7ppm
Ti	Titan	24,9595	50,9ppm	0,5ppm
Zn	Zinek	282,9922	30,6ppm	0,2ppm
Ta	Tantal	52,792	17,7ppm	0,4ppm
K	Draslík	2,5576	14,7ppm	0,9ppm
Cr	Chrom	13,1167	13,6ppm	0,7ppm
Co	Kobalt	8,8882	12,9ppm	1,0ppm
P	Fosfor	4,0651	7,6ppm	0,5ppm
Hf	Hafnium	13,0637	4,5ppm	0,3ppm
Mn	Mangan	10,7188	3,7ppm	0,2ppm
Cu	Měď	22,8445	3,5ppm	0,2ppm
W	Wolfram	10,6809	2,3ppm	0,2ppm
Ni	Nikl	17,8293	2,3ppm	0,1ppm
Si	Křemík	10,9393	1,9ppm	0,1ppm

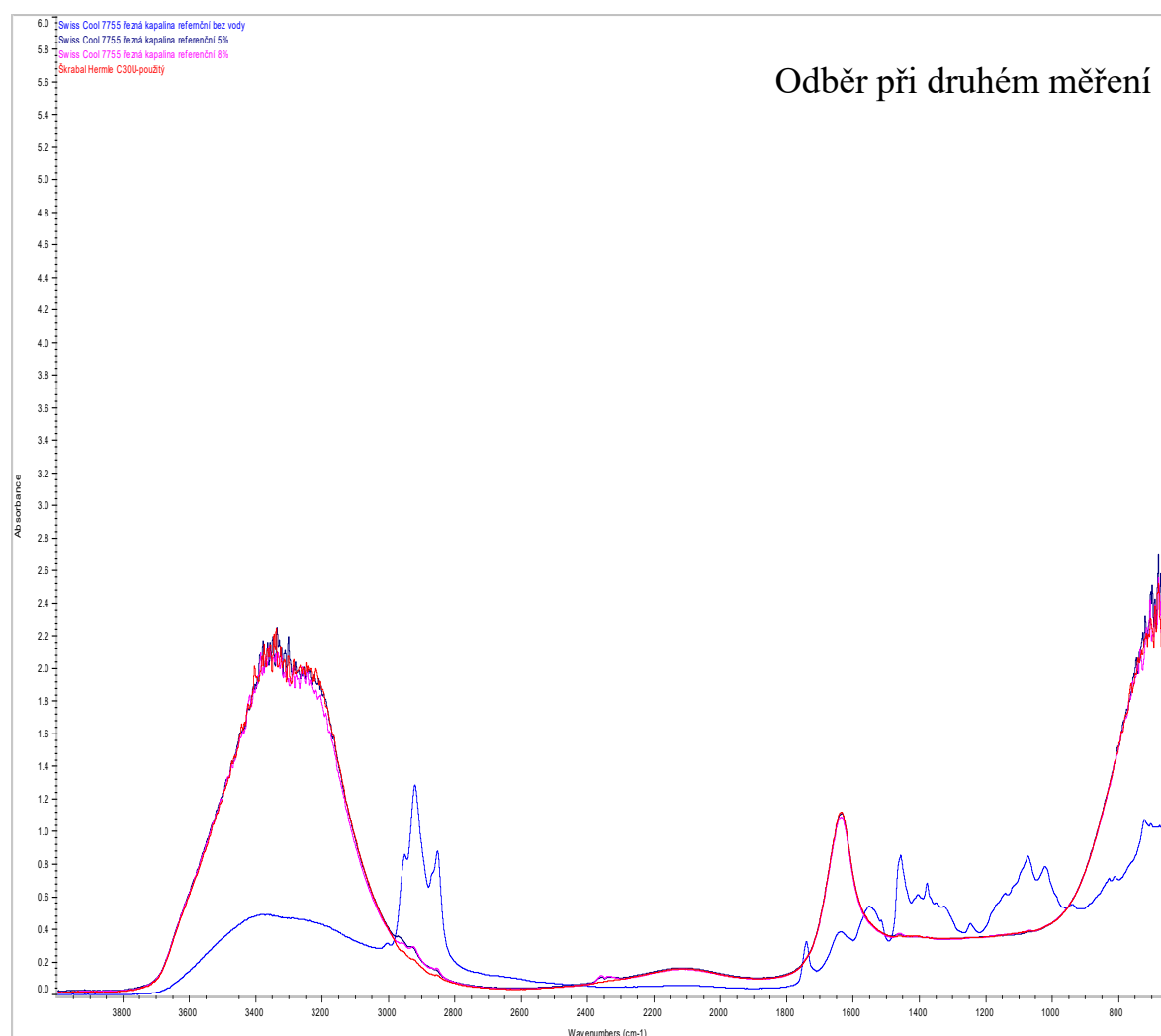
V referenčním vzorku řezného oleje bylo zjištěno téměř 600 ppm železa, což naznačuje špatnou kvalitu oleje od dodavatele. Podle zjištěných nečistot se domnívám, že sud ve kterém byl olej dodán již byl použit a nebyl řádně vyčištěn před naplněním čistým řezným olejem.

8.3 Spektrální analýza FT-IR

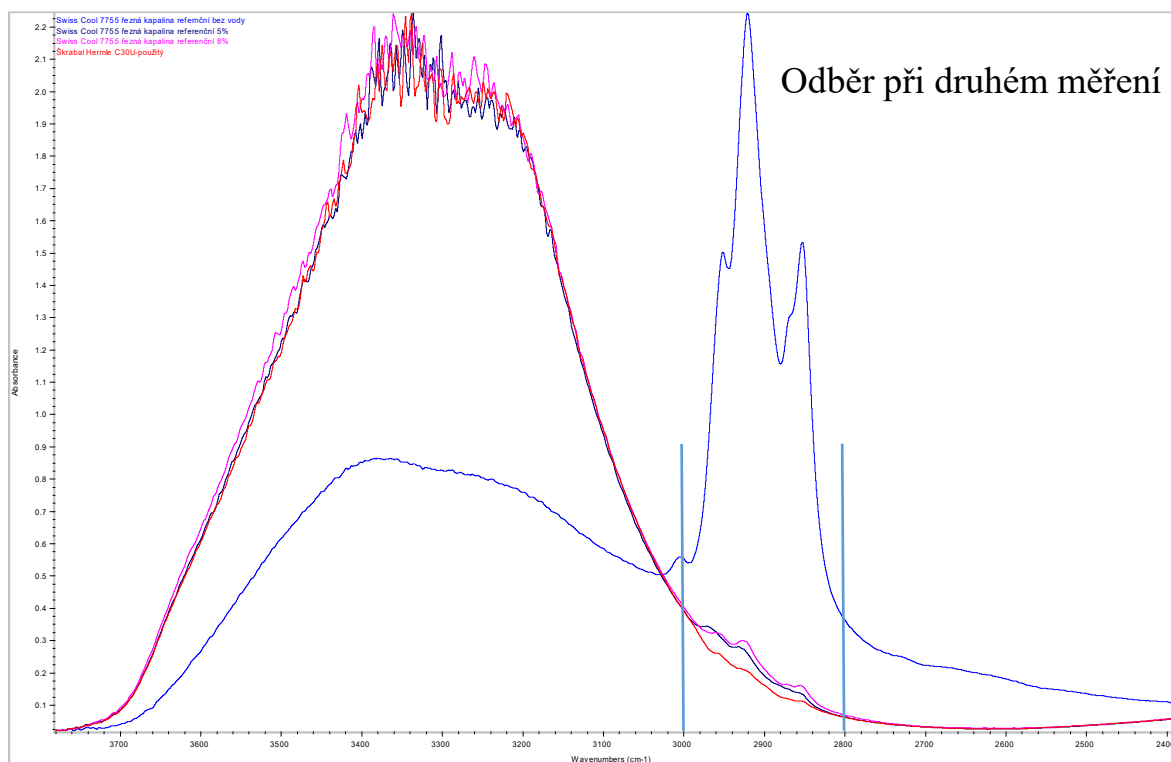
Pomocí metody FT-IR byly proměřeny všechny vzorky. Při měření jsem se zaměřil na porovnávání odebraných vzorků s namíchanými vzorky o koncentraci 5% a 8%. Každé měření trvalo zhruba 1 minutu. Při vyhodnocování vzorků jsem sledoval oblast základních uhlovodíků, 8% koncentrace oleje ve vodě je horní hranice, na kterou se řezná kapalina míchá a měla by mít křivku základních uhlovodíků nejvyšší.



Obr. 66 Metoda FT-IR přístrojem Impact 410, napravo vzorek ve stroji [Autor]

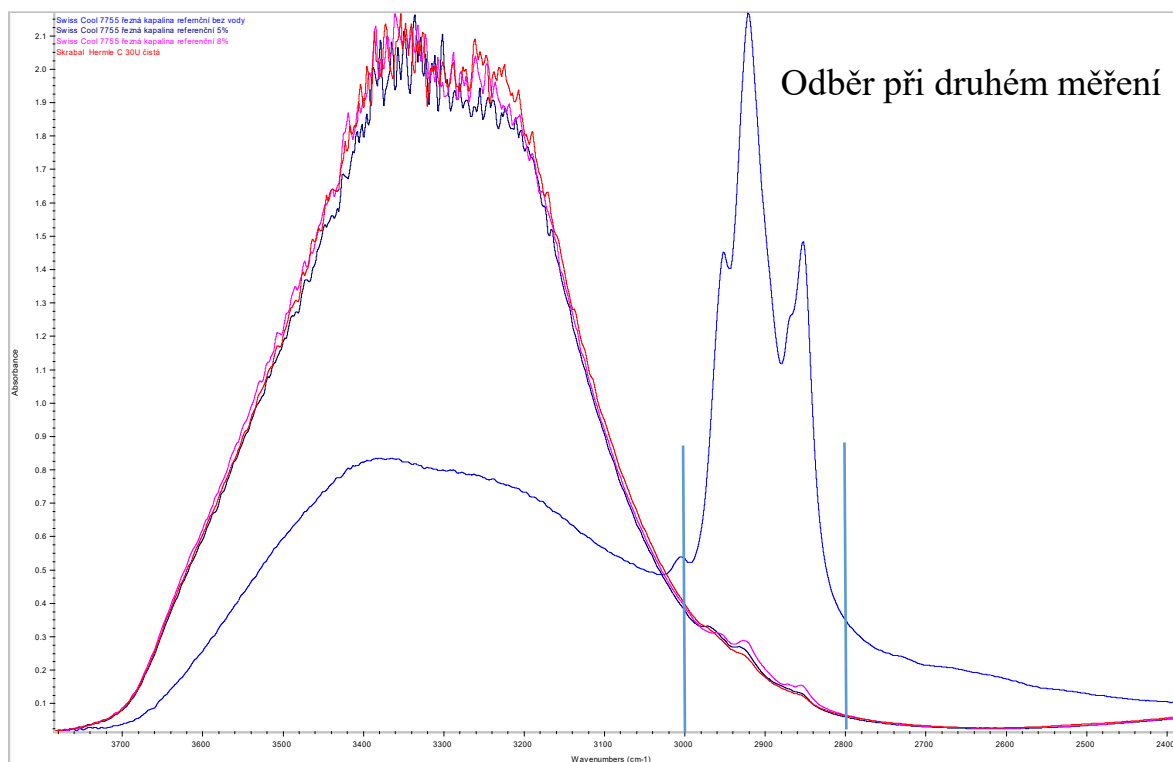


Obr. 67 Spektrum namíchaných vzorků, referenčního oleje a použité řezné kapaliny



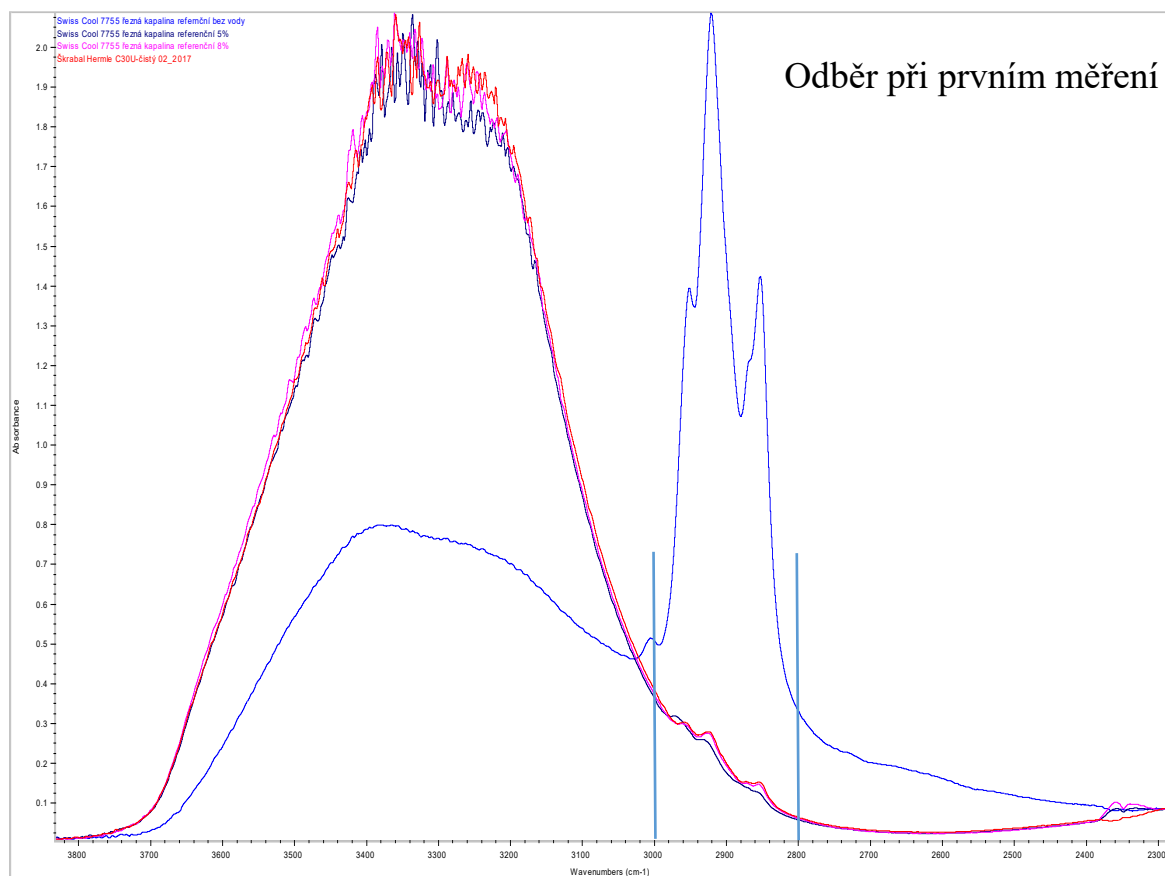
Obr. 68 Spektrum namíchaných vzorků, referenčního oleje a použité řezné kapaliny s vyznačeným pásmem základních uhlovodíků

Při porovnání v pásmu základních uhlovodíků ($2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$) je patrné, že odebraná použitá řezná kapalina nedosahuje ani křivky koncentrace 5%.



Obr. 69 Spektrum namíchaných vzorků, referenčního oleje a čisté řezné kapaliny

Čistá řezná kapalina téměř odpovídá křivce 5% koncentrace oleje, lze tedy usoudit, že je kapalina míchána ve správném poměru.

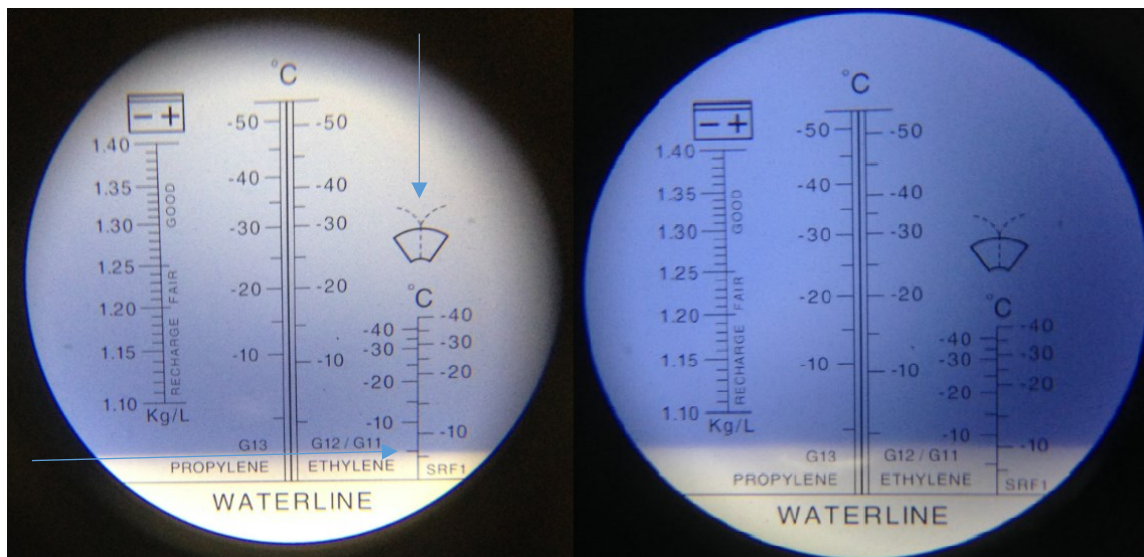


Obr. 70 Spektrum namíchaných vzorků, referenčního oleje a čisté řezné kapaliny

Vzorek čisté řezné kapaliny odebraný při prvním měření dosahuje lehce vyšší koncentrace základních uhlovodíků, než je koncentrace u 8% namíchané směsi. Doporučuji tedy přesnější míchání řezné kapaliny, případnou kontrolu namíchané koncentrace. Mírné deformace křivek mohou být způsobeny vysokým poměrem vody v řezné kapalině. Pásmo určené pro vyhodnocování FT-IR metody není ideální, ale pro porovnání řezné kapaliny bylo určeno jako nejvhodnější, v ostatních pásmech nebylo možné řezné kapaliny vyhodnotit.

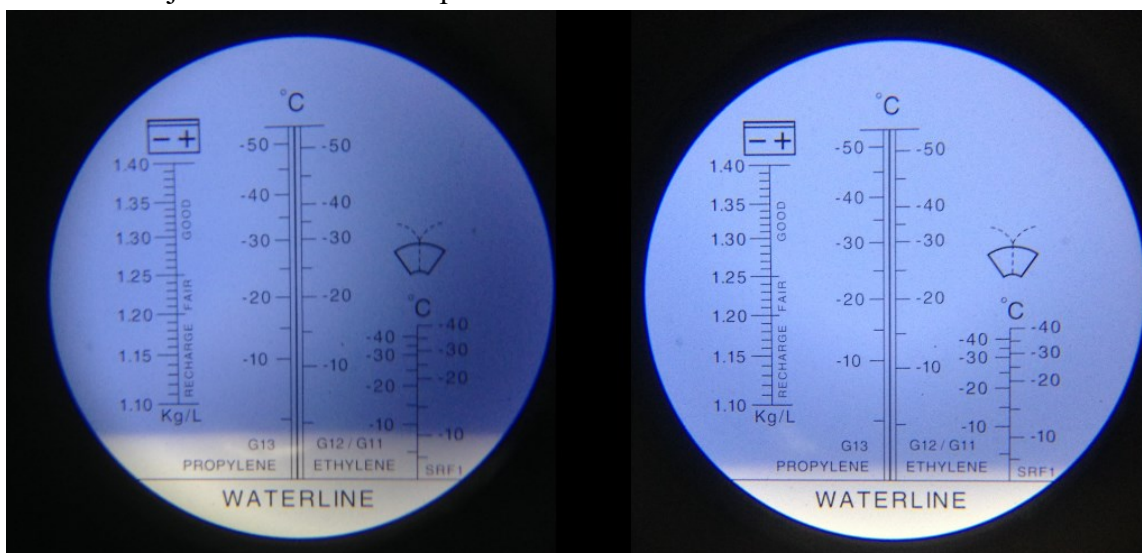
8.4 Měření refraktometrem

Pomocí refraktometru a jeho stupnice byly experimentálně určeny koncentrace oleje ve vodě. Postupně jsem sledoval hranici mezi bílou a modrou barvou zobrazující se v okuláru refraktometru na ethylenové stupnici.



Obr. 71 Pohled do okuláru refraktometru se zvýrazněnou ethylenovou stupnicí, vlevo 5% koncentrace oleje, vpravo 8% koncentrace oleje ve vodě[Autor]

Na ethylenové stupnici bylo zjištěno, že zhruba -1°C odpovídá koncentraci 1% oleje ve vodě. Na obrázku 71 je vidět, že hranice se nachází na -8°C , což by mělo odpovídat horní hranici 8% oleje ve vodě v řezné kapalině.



Obr. 72 Vlevo vzorek s 8% koncentrací, vpravo odebraný vzorek použité řezné kapaliny [Autor]

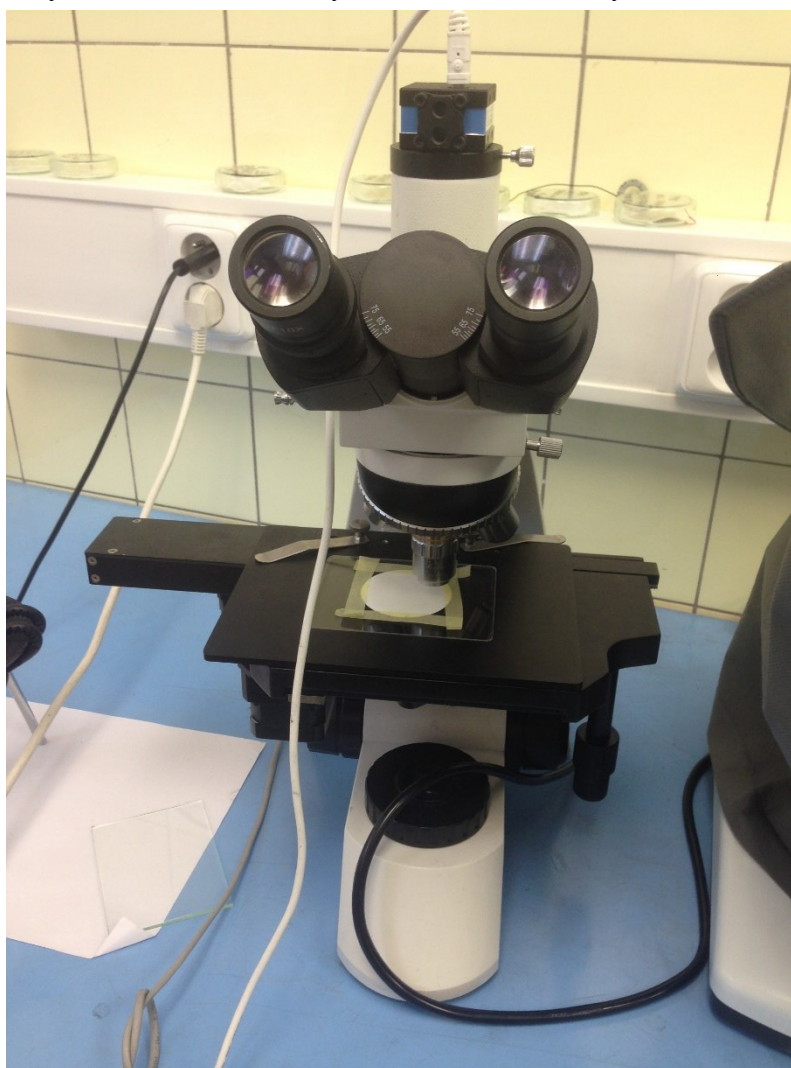
8.5 Stanovení kódu čistoty

Pomocí mikroskopu byla určena velikost a počet nečistot pro referenční vzorek řezného oleje dle normy NAS 1638. Dle této normy se dělí čistota hydraulických kapalin do 12 tříd. Určení třídy čistoty je podle počtu zjištěných částic nečistot a jejich velikosti, podle velikosti částic je určeno 6 rozsahových skupin.

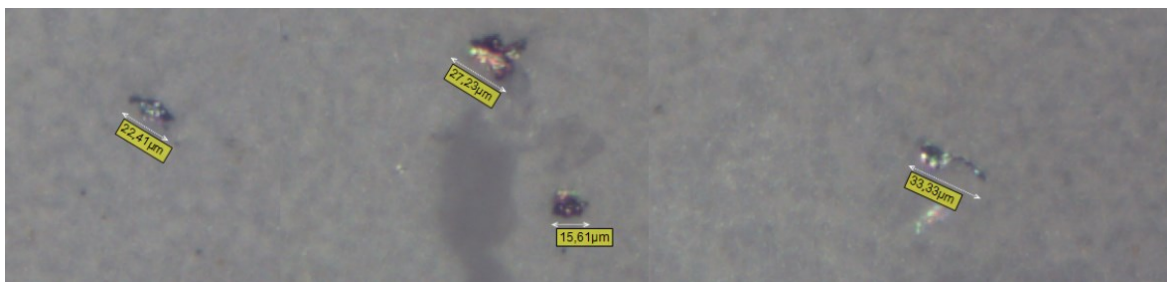
Třída čistoty referenčního vzorku řezného oleje dle normy NAS 1638 odpovídá třídě 9.

Kód čistoty dle normy ČSN ISO 4406/99 je stejná metoda vyhodnocování na mikroskopu ale při vyhodnocení se kód skládá ze tří čísel odpovídajících počtu nalezených částic v 1ml vzorku. První číslo udává počet zjištěných částic $\geq 4 \mu\text{m}$, druhé číslo $\geq 6 \mu\text{m}$ a třetí $\geq 14 \mu\text{m}$.

Dle této normy ČSN ISO 4406/99 byl stanoven kód čistoty 15/15/12.



Obr. 73 Mikroskop propojený s PC při provedení kódu čistoty [Autor]



Obr. 74 Pohled do okuláru mikroskopu při určování kódu čistoty [Autor]

8.6 Zhodnocení tribodiagnostického měření

Pomocí refraktometru a ethylenové stupnice lze rychle určit procentuální obsah řezného oleje ve vodě. Tato metoda ale není přesná, toto měření je experiment a potvrzení měření dalšími metodami. Je nutné, aby kapalina byla rozprostřena po celé zešíkmené ploše krystalu refraktometru, po přiklopení průhledné destičky by byla hranice přechodu modré a bílé v okuláru refraktometru rozmazána a není možné přesně určit koncentraci na stupnici.

Měření pomocí metody FT-IR potvrdilo předpokládané koncentrace oleje v řezné kapalině, tato metoda je daleko přesnější než měření refraktometrem a tak ji přikládám daleko větší váhu. Samotné měření metodou FT-IR netrvá dlouho, náročná je následná analýza naměřených spekter. Naměřená spektra byly lehce deformována vysokou koncentrací vody v oleji a tak bylo nutné zaměřit se pouze na pásmo základních uhlovodíků a provést v něm analýzu.

Rentgenovou spektrometrií byla zjištěna vysoká koncentrace železa a titanu v čistém referenčním vzorku řezného oleje. To je nejspíš způsobeno barelem, ve kterém je olej uložen. V dalších odebraných vzorcích byly zjištěny zvýšené koncentrace hliníku a hořčíku, to jsou prvky, které pochází z obrobků z hliníkových slitin.

Měření pro stanovení celkového znečištění potvrdilo znečištění referenčního vzorku řezné kapaliny. Kód čistoty 15/15/12 odpovídá většímu znečištění čistého oleje, třída 9 dle normy NAS 1638 také odpovídá zvýšenému počtu nečistot. Je tedy velmi pravděpodobné, že sud ve kterém byl dodán řezný olej byl již používán a před naplněním nebyl řádně vyčištěn a zůstaly v něm usazené nečistoty.

9. Termodiagnostické měření

Termodiagnostika byla provedena během chodu stroje a těsně po dokončení práce na stroji. Měření bylo zaměřeno na rozvaděče a důležité elektrické rozvody a chlazení.

9.1 IR termokamera Fluke Ti32

Jedná se o průmyslovou IR termokameru pro sledování poruch během běžného servisu a údržby. Tento model poskytuje výbornou kvalitu obrazu, umožňuje měnit objektivy, je odolný vůči pádům a má jednoduché intuitivní ovládání. Rozlišení snímáče je 320 x 240 bodů, s funkcí automatického zarovnání optického a infračerveného snímku.



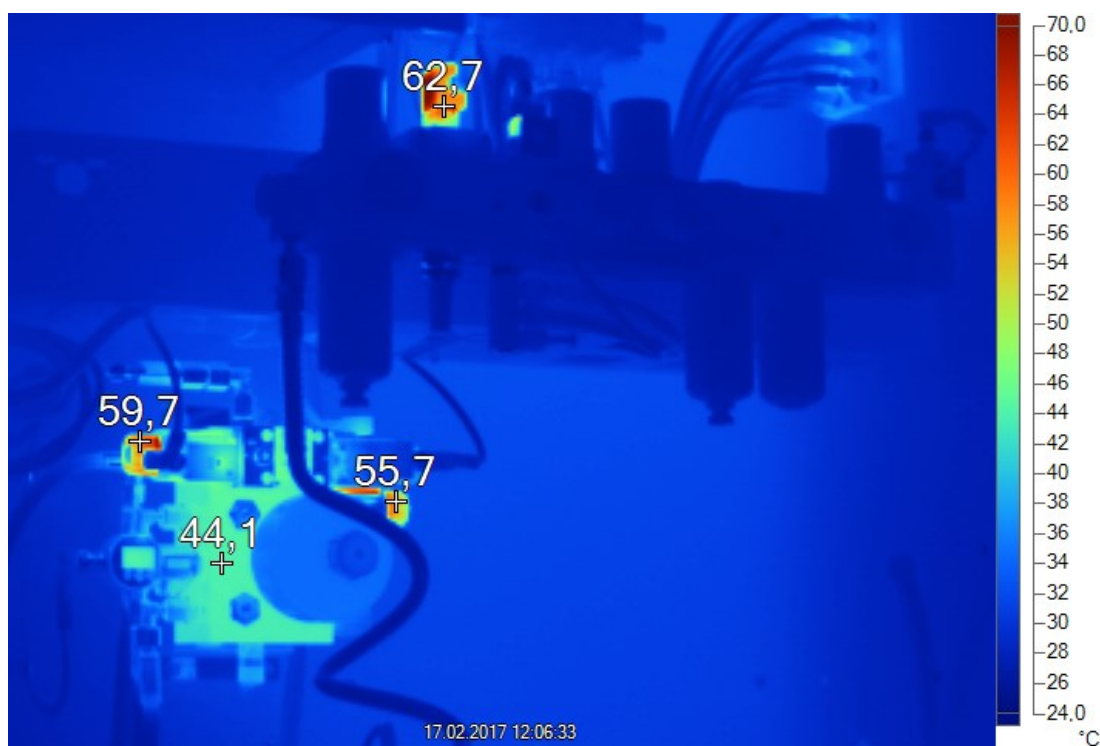
Obr. 75 IR termokamera Fluke Ti32 [Autor]

9.2 Měřená místa

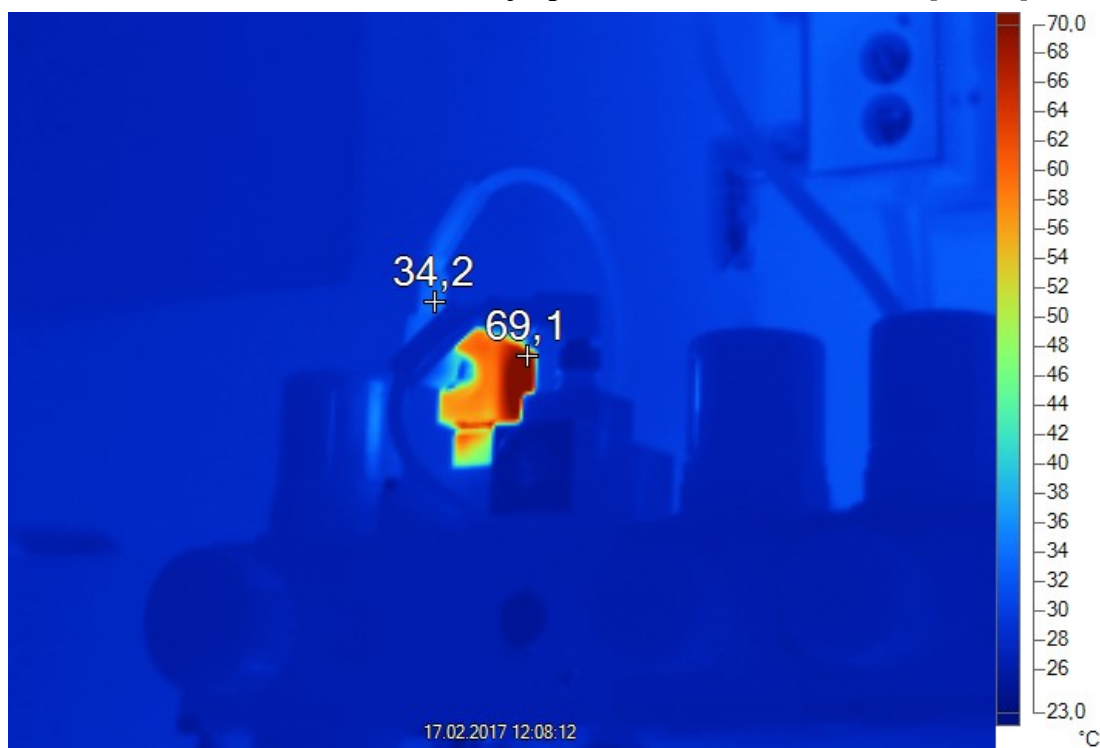
IR termokamerou jsem zkontroloval celý stroj, zaměřil jsem se na elektrorozvaděče, rozvaděče maziv a další prvky na stroji. Sledoval jsem teplotní rozdíly a maximální dosažené teploty. Pořízené snímky jsem analyzoval v software SmartView.

Tab. 14 Kritéria pro vyhodnocování termodiagnostiky stanovena na základě konzultací a zkušeností

Kvalifikační stupeň	Rozdíl teplot	Nápravné opatření
I	0 ÷ 10 °C	Žádná opatření
II	10 ÷ 35 °C	Zvýšená pozornost
III	35 ÷ 100 °C	Opravit při následující odstávce
IV	100 °C a více	Opravit co nejdříve

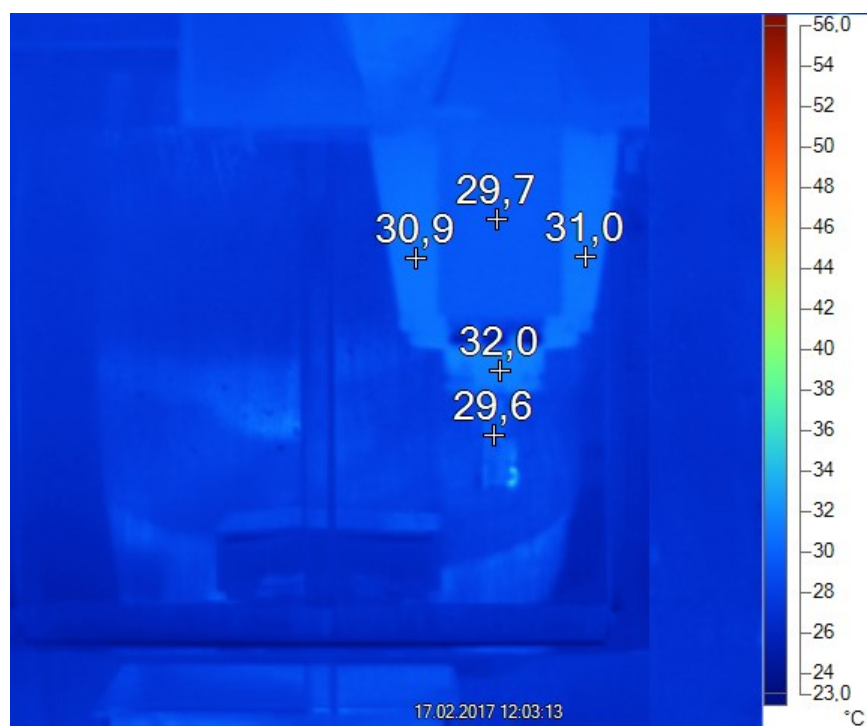


Obr. 76 Zadní strana stroje, pohled na rozváděč maziva [Autor]

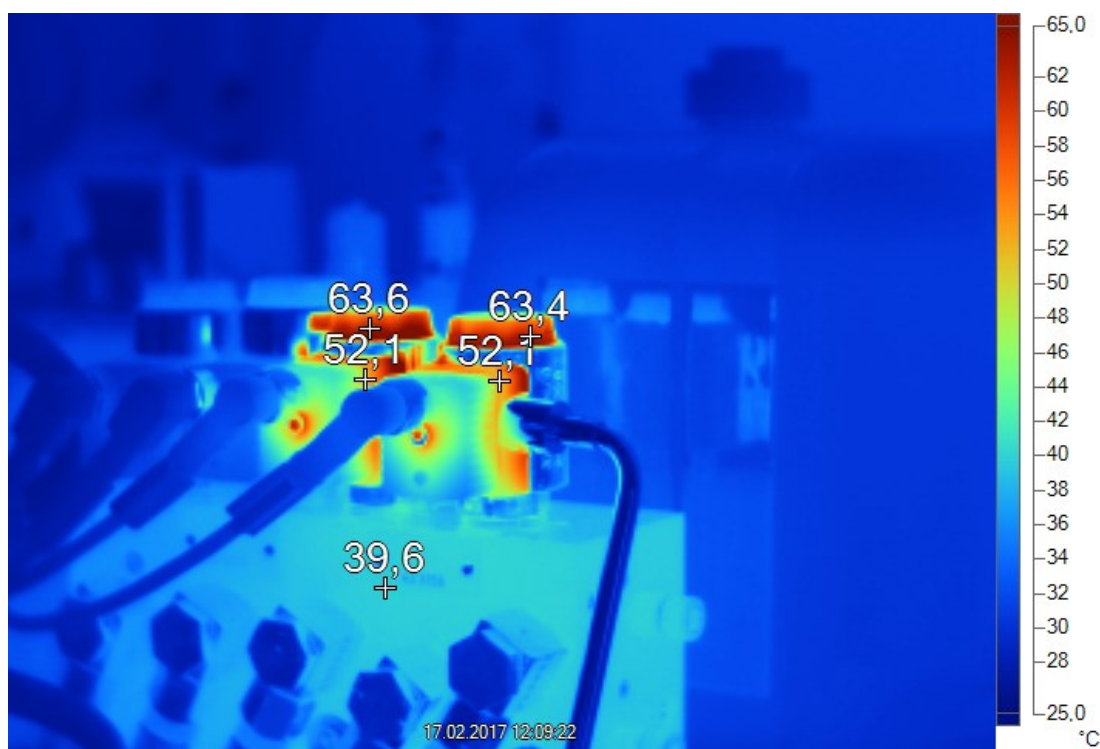


Obr. 77 Detailní záběr na prvek rozváděče maziva [Autor]

U všech měřených míst jsem hledal teplotní rozdíly mezi stejnými prvky, případně zvýšené teploty nad přípustnou teplotu. Stejně prvky, u kterých je teplotní rozdíl větší než 30°C je třeba sledovat se zvýšenou pozorností.



Obr. 78 Pohled na vřeteno těsně po dokončení práce [Autor]

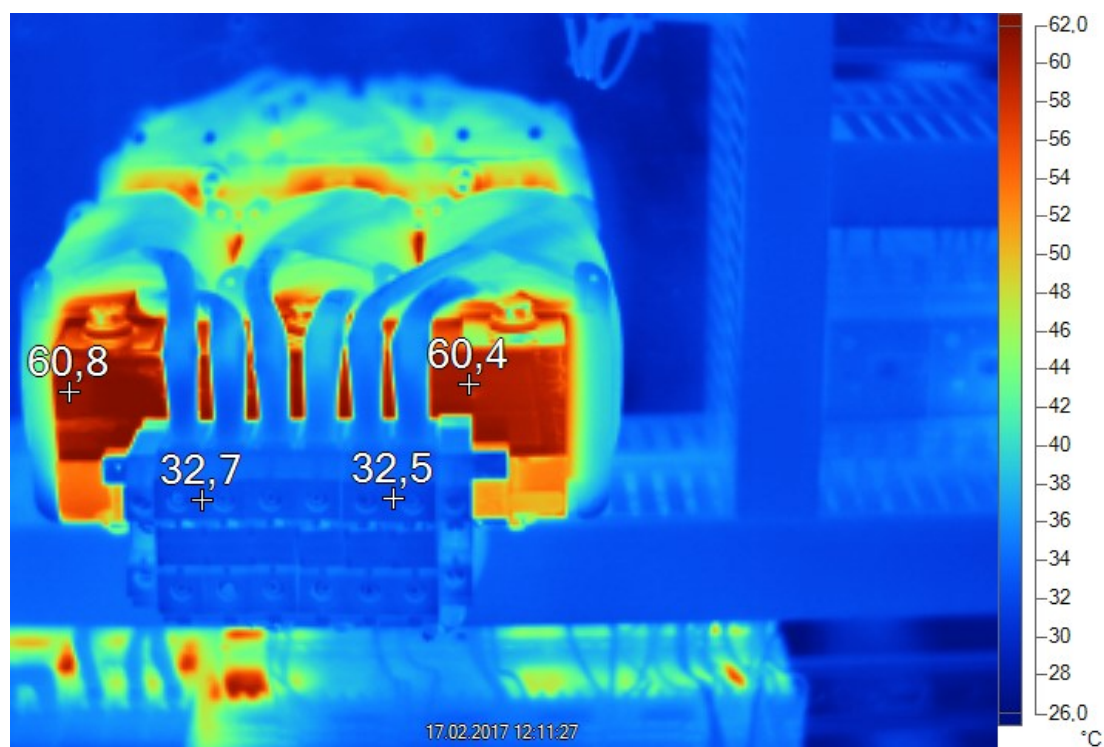


Obr. 79 Stejné hodnoty teplot u rozvaděče maziva [Autor]

Na vřetenu není patrná žádná zvýšená teplotní oblast a teploty dosahují velmi nízkých teplot, je to způsobeno vydatným chlazením nástroje, nedochází ani k zahřívání pracovního prostoru. Na obrázku 77 lze vidět stejné teploty u rozvaděče maziva, z toho lze usoudit, že oba prvky pracují správně, zahřívají se stejnoměrně.



Obr. 80 Pohled do skříně s elektrickými prvky [Autor]



Obr. 81 Blížeší pohled na elektrický rozvaděč pro zjištění teplotního rozdílu [Autor]

Při bližším pohledu do skříně s elektrickými jističi a dalšími zařízeními lze zjistit, že se většina prvků zahřívá stejnoměrně a nepřesahují pracovní teploty. Na obrázku 78 je teplotní rozdíl u stejných prvků téměř 10 °C, což je stále ještě v pořádku.

9.3 Zhodnocení termografického měření

Termografické měření neodhalilo žádné závažné problémy na stroji, všechny prvky se zahřívají stejnoměrně a nepřekročují hranici 70°C, což se dá považovat za vyhovující provozuschopnou teplotu. Ve skříní s elektro prvky je vše v pořádku, zvýšenou pozornost je možno věnovat stejným prvkům s teplotním rozdílem větším než 10°C. Je nutno porovnávat měřenou teplotu na prvku s teplotou okolí a zohlednit zda je prvek používán a na kolik % je stroj zatížen.

10. Zhodnocení a doporučení

Výsledky měření vibrací byly částečně ovlivněny různými nástroji při měření, při větším průměru nástroje byly naměřeny větší rychlosti vibrací. Při analýze dat byla zjištěna mírná nevyváha projevující se v horizontálním směru a rezonance při 6000 ot/min. Tato rezonance byla potvrzena i bump testem. Frekvence rezonance odpovídá 99,5 Hz, v přepočtu 5970 ot/min. Zvýšené hodnoty rychlosti vibrací byly naměřeny i pro 15000 ot/min a 18000 ot/min. Při těchto otáčkách se opět projevuje nevyváha v horizontálním směru. Takto vysoké otáčky ale nejsou na stroji využívány.

Při rozboru odebraných vzorků řezných kapalin a referenčního vzorku řezného oleje byly zjištěny nepatrné odchylky v koncentraci oleje ve vodě. Mezi prvky, které nepatří do řezného oleje, byl zjištěn zvýšený obsah železa a titanu v čistém referenčním vzorku. Míchání řezného oleje s vodou téměř odpovídá předem stanoveným hodnotám 5% a 8%. Měření mohlo být částečně ovlivněno vysokým podílem vody v řezných kapalinách. Použitím metody FTIR a refraktometrem byly tyto koncentrace ověřeny.

Termodiagnostika byla provedena pro všechny části stroje a nebyly při ní zjištěny žádné závažné problémy. Při práci se nadměrně nezahřívá vřeteno, nástroj ani vnitřní prostor kabiny. U rozváděčů maziva byly naměřeny zvýšené teploty, ale tyto teploty nijak neomezují provozuschopnost stroje a měly by být v pořádku. Při kontrole elektrických prvků bylo také vše v pořádku, sledování rozdílu teplot u stejných prvků neodhalilo poruchu ani velký teplotní rozdíl. Naměřené teploty byly v pořádku i vůči okolní teplotě.

Doporučuji zaslat naměřená data výrobci stroje, který provádí na stroji i údržbu, aby se vyjádřil ke zjištěné rezonanci, vzhledem k nedávno provedené výměně elektromotoru by na stroji neměla být žádná rezonance. Při provozu stroje doporučuji nevyužívat, případně rychle překročit 6000 ot/min. Při míchání řezné kapaliny kontrolovat přesnost koncentrace řezného oleje ve vodě a zjistit příčinu přítomnosti železa a titanu v čistém řezném oleji, případně zlepšit skladování oleje. Dále doporučuji pravidelnou kontrolu elektrických prvků a rozváděčů maziva a při zvýšení teplot provést výměnu.

11. Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval řešením a analýzou problematiky multiparametrického přístupu technické diagnostiky použitého na obráběcím centru Hermle C30 U ve společnosti Ray Service a.s. Během konzultací po provedení prvního měření bylo rozhodnuto o provedení dalších měření včetně měření bump testem pro přesnější výsledky analýzy stavu stroje.

Pro vyhodnocení naměřených dat vibrací sloužila jako předloha norma ČSN 200065. Tato norma určuje přípustné velikosti celkových vibrací, posouzení velikosti zrychlení byly určeny hodnoty na základě zkušenosti a konzultací s vedoucím diplomové práce. Stav stroje dle naměřených hodnot je v pořádku, ale při vyšších otáčkách byla zjištěna nevývaha projevující se v horizontálním směru. Během analýzy naměřených dat byla zjištěna rezonance při 6000 ot/min která byla potvrzena Bump testem. Nevývaha i rezonance ovlivňují přesnost obrábění a mohou vést k dalšímu zhoršování stavu stroje.

Při vyhodnocování řezného oleje byla zjištěna zvýšená koncentrace železa a titanu, což může být způsobeno nečistotami v barelu, nebo nesprávným uskladněním barelů. Metody FTIR a měření pomocí refraktometru pouze potvrdily stanovené koncentrace oleje ve vodě a neodhalily žádné další problémy.

Použití termodiagnostiky pro správné určení stavu stroje multiparametrickým přístupem bylo vhodné, jelikož jsem mohl zkontrolovat stav rozváděčů maziva a elektrické prvky na stroji. Avšak žádné závažné problémy zjištěny nebyly.

Ideálním řešením je zvýšená četnost měření vibrací na stroji z důvodu přítomnosti rezonance a sledování teplot na rozvaděčích maziva a u elektrických prvků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*, vydala VŠB – Technická univerzita Ostrava 2004, 178 s., ISBN 80-248-0650-9
- [2] HELEBRANT, F.: *Technická diagnostika a spolehlivost IV – Provoz a údržba strojů*, vydala VŠB – Technická universita Ostrava 2008, 130 s., 1. vydání, ISBN 978–80–248–1690–6
- [3] TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů použitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [4] MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin. ČVUT v Praze 2001*, 231s., ISBN 80.01-02417-2
- [5] Helebrant František, Hrabec Ladislav, Blata Jan, *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Tribodiagnostika kapalných maziv a strojních součástí*, Ostrava, 2013, 31 stran, ISBN 978-80-248-3028-5
- [6] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001, 155 s. ISBN 80-7078-883-6.
- [7] *Úvod do principů termografie* [online]. [cit. 2017-25-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65646
- [8] *Termovizní měření - teorie* [online]. [cit. 2017-25-04]. Dostupné z: <http://www.termovize.com/termovizni-mereni-teorie>
- [9] ČSN 20 0065. *Obráběcí stroje na kovy. Metody měření a hodnocení mechanického kmitání. Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [10] Ray Service a.s. [online] Dostupné z WWW: <http://www.rayservice.com>

- [11] Manufacturing News [online] dostupné z WWW: <http://www.mfgnewsweb.com/archives/4/36937/IMTS-Product-Preview-aug12/Hermle-Exhibit-to-Focus-on-5-Axis-Capabilities-in-Zero-Stock-and-Hard-Machining.aspx>
- [12] SciDAVis Handbook [online] Dostupné z WWW: <http://scidavis.sourceforge.net/manual/c4166.html>
- [13] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. [online] Dostupné z WWW: [www https://www.bksv.com/en/products/PULSE-analysis-software](http://www.bksv.com/en/products/PULSE-analysis-software)
- [14] Technická diagnostika a její metody [online] Dostupné z WWW: <http://interdiago.vsb.cz/kom/upload/12-Provoz,%20diagnostika%20a%20%C3%BAdr%C5%BEba%20stroj%C5%AF.pdf>
- [15] Dürr Ecoclean, spol. s r.o. [online] Dostupné z WWW: <http://www.schenck-rotec.cz/why-balancing/static-unbalance.php>
- [16] Technická diagnostika a její metody [online] Dostupné z WWW: <http://interdiago.vsb.cz/kom/upload/12-Provoz,%20diagnostika%20a%20%C3%BAdr%C5%BEba%20stroj%C5%AF.pdf>